

La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile? a cura di R. Danielis

La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?

a cura di
Romeo Danielis



Impaginazione
Gabriella Clabot

© copyright Edizioni Università di Trieste, Trieste 2019

Proprietà letteraria riservata.
I diritti di traduzione, memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento totale e parziale di questa
pubblicazione, con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm,
le fotocopie e altro) sono riservati per tutti i paesi.

ISBN 978-88-5511-107-2 (online)

EUT Edizioni Università di Trieste
via Weiss 21 - 34128 Trieste
<http://eut.units.it>
<https://www.facebook.com/EUTEdizioniUniversitaTrieste>

La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?

a cura di
Romeo Danielis

Indice

- ROMEO DANIELIS
VII Introduzione
- ROMEO DANIELIS
1 La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?
- LUCIA ROTARIS
73 Cambiamenti climatici e trasporto aereo: dimensioni del problema e soluzioni proposte
- TULLIO GREGORI, MARIANGELA SCORRANO
103 The impact of trade, urbanization and biomass energy consumption on CO₂ emissions: results from a panel of emerging and frontier countries
- SAIFUL HASAN, THOR-ERIK SANDBERG HANSEN, TERJE ANDREAS MATHISEN
121 A review of the academic literature on Electric Vehicles in the social sciences
- MARCO GIAN SOLDATI, ADRIANA MONTE, MARIANGELA SCORRANO, ANDREA PARMA
139 Indagine sulle barriere all'acquisto delle auto elettriche. Evidenze su un campione di rispondenti italiani
- MARIANGELA SCORRANO
171 Esiste un mercato per gli scooter elettrici in Italia? Evidenze da un'indagine sulle preferenze dichiarate nella città di Trieste
- ADRIANA MONTE, MARCO GIAN SOLDATI
197 Evidenze sulle abitudini modali e sulla sostenibilità dei trasporti in ambito accademico. Il caso dell'Università di Trieste
- MARIANGELA SCORRANO, ALESSANDRO MASSI PAVAN
221 Microgrids as drivers in the global energy transition towards renewables
- 231 Abstracts
- 241 Authors

Introduzione

ROMEO DANIELIS

Il libro raccoglie i contributi presentati nella giornata di studio “La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?”, tenutasi il 28 maggio 2019 nell’ambito del Festival dello Sviluppo Sostenibile presso il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche dell’Università di Trieste. A questi si sono poi aggiunti i contributi di Mariangela Scorrano e Tullio Gregori e di Thor-Erik Sandberg Hanssen, Saiful Hasan, e Terje Andreas Mathisen.

Nel 2018 le emissioni di CO₂ a livello mondiale sono state pari a 37,1 gigatonnellate (Gt), con una tendenza ancora in crescita. Siccome a tale aumento si associa un progressivo innalzamento della temperatura media del pianeta, gli accordi di Parigi sui cambiamenti climatici stipulati nel 2015 e firmati da 184 paesi mirano a ridurre le emissioni di CO₂ al fine contenere l’aumento della temperatura nel 2050 a livello di 1,5 (massimo 2,0) gradi superiori ai livelli preindustriali. Per realizzare questi obiettivi è necessario che tutti i settori di attività economica e produttiva contribuiscano a ridurre i loro attuali livelli di emissioni. Tra questi, il settore trasporti ha una grande responsabilità, in quanto nel 2018 ha emesso 6,4 Giga tonnellate di CO₂ (escludendo dal calcolo il bunkeraggio marittimo internazionale ed il trasporto aereo internazionale), pari a poco meno del 20% del totale. Ciò è legato al fatto che il settore dei trasporti è quasi esclusivamente dipendente da combustili fossili (per circa il 93%), in particolare di quelli

derivanti dal petrolio, utilizzati per alimentare i motori a combustione interna dei veicoli con effetti avversi sia a livello locale (inquinamento atmosferico) sia a livello globale (le emissioni di CO₂.) Gli elementi di preoccupazione si accrescono ulteriormente osservando che in diverse aree del mondo, tra cui anche l'Europa occidentale, quindi in un'area ricca e tecnologicamente avanzata, mentre a livello complessivo le emissioni totali di CO₂ calano, le emissioni del settore dei trasporti aumentano sia in termini relativi che in termini assoluti. Nei paesi in via di sviluppo, dove i livelli di mobilità e di motorizzazione erano più bassi, tali dinamiche di crescita connesse anche allo sviluppo economico ed alla conseguente maggiore mobilità delle persone e delle merci, sono, e si prevede saranno, ancora più accentuate.

Il libro si interroga se e come la decarbonizzazione dei trasporti sia possibile.

Romeo Danielis, in contributo intitolato "La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?", affronta il tema in termini generali, considerando tutte le modalità di trasporto, analizzando le tendenze in atto, le previsioni per il futuro e discutendo se e quali politiche possano contribuire a ridurre le emissioni di CO₂. Lucia Rotaris, in un contributo intitolato "Cambiamento climatico da trasporto aereo: dimensioni del problema e soluzioni proposte", concentra la sua attenzione sul trasporto aereo che in questi ultimi anni ha mostrato le dinamiche di crescita delle emissioni di CO₂ più elevate. Mariangela Scorrano e Tullio Gregori, in "The impact of trade, urbanization and biomass energy consumption on CO₂ emissions: results from a panel of emerging and frontier countries", analizzano la relazione di lungo periodo tra emissioni di CO₂, biomasse, PIL, urbanizzazione, apertura commerciale ed il consumo di energia in un panel bilanciato di 21 paesi emergenti e di frontiera per il periodo 1973-2014. Thor-Erik Sandberg Hanssen, Saiful Hasan, Terje Andreas Mathisen, nel saggio intitolato "A review of the academic literature on Electric Vehicles in the social sciences", passano in rassegna la letteratura accademica sui veicoli elettrici con lo scopo di esaminare lo sviluppo storico della ricerca accademica, identificare i contributi più importanti, gli argomenti di ricerca più frequentemente trattati e quelli su cui la ricerca accademica è ancora carente. Marco Giansoldati, Adriana Monte, Mariangela Scorrano e Andrea Parma, in contributo intitolato "Indagine sulle barriere all'acquisto delle auto elettriche. Evidenze su un campione di rispondenti italiani.", analizzano le cause del basso livello di penetrazione delle auto elettriche in Italia (circa 0,5% sul totale delle immatricolazioni nel 2019) e le strategie per rimuoverle. Mariangela Scorrano, nel saggio intitolato "Un mercato per gli scooter elettrici in Italia? Evidenze da un'indagine sulle preferenze dichiarate" si concentra, invece, sulle potenzialità di adozione degli scooter elettrici, evidenziandone i vantaggi e gli svantaggi rispetto quelli a benzina e valutando le loro prospettive di mercato sulla base di un'indagine di preferenza dichiarata realizzata intervistando stu-

denti triestini. Adriana Monte e Marco Giansoldati, in “Evidenze sulle abitudini modali e sulla sostenibilità dei trasporti in ambito accademico. Il caso dell’Università di Trieste”, si interrogano sulla promozione di una mobilità sostenibile a livello universitario. Presentano e discutono i risultati di studio che ha indagato le abitudini di mobilità degli studenti, dei docenti e del personale tecnico amministrativo dell’Università di Trieste, con particolare enfasi sulla sensibilità ambientale espressa dalla comunità universitaria. Infine, Mariangela Scorrano e Alessandro Massi Pavan, in un contributo intitolato “Microgrids as drivers in the global energy transition towards renewables”, illustrano i principali trend che stanno guidando il boom delle rinnovabili, con il fotovoltaico che funge da portabandiera. Inoltre, propongono le microreti come innovazione in grado di bilanciare la produzione variabile di energia rinnovabile con le attività di generazione tradizionali, contribuendo anche a rafforzare il ruolo delle fonti rinnovabili nel mix energetico. Sottolineano come esse forniscano energia pulita, efficiente, a basso costo, migliorino la resilienza locale ed il funzionamento e la stabilità della rete elettrica.

La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?

ROMEO DANIELIS

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 combustili 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 2017c). L'effetto avverso, della cui gravità ci si rende sempre più conto, sono le emissioni atmosferiche, di gas inquinanti locali e di CO₂. Questo volume si incentra principalmente su quest'ultimo in ragione del suo contributo all'innalzamento delle temperature del pianeta¹.

¹ L'anidride carbonica (CO₂) è nota come gas a effetto serra (GHG), un gas che assorbe ed

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). Ma vale la pena di entrare nel dettaglio dei dati e dei modelli per renderci conto analiticamente della difficoltà di raggiungere tale obiettivo e degli spiragli di opportunità che ci vengono offerti dalle politiche e dalla ricerca scientifica.

Nel seguito, inizieremo esaminando le evidenze empiriche sulle attuali emissioni di CO₂, in generale e nei trasporti in particolare, e le relative previsioni al 2050. Proseguiremo analizzando le tendenze in atto nel trasporto dei passeggeri e delle merci, suddividendo l'analisi in ragione della distanza, in quanto i problemi e le opportunità sono diverse a seconda delle fasce di mobilità e dei mercati di riferimento. Quindi, 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 emissioni 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. Seguiranno alcune considerazioni finali.

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.

2. I DATI STATISTICI

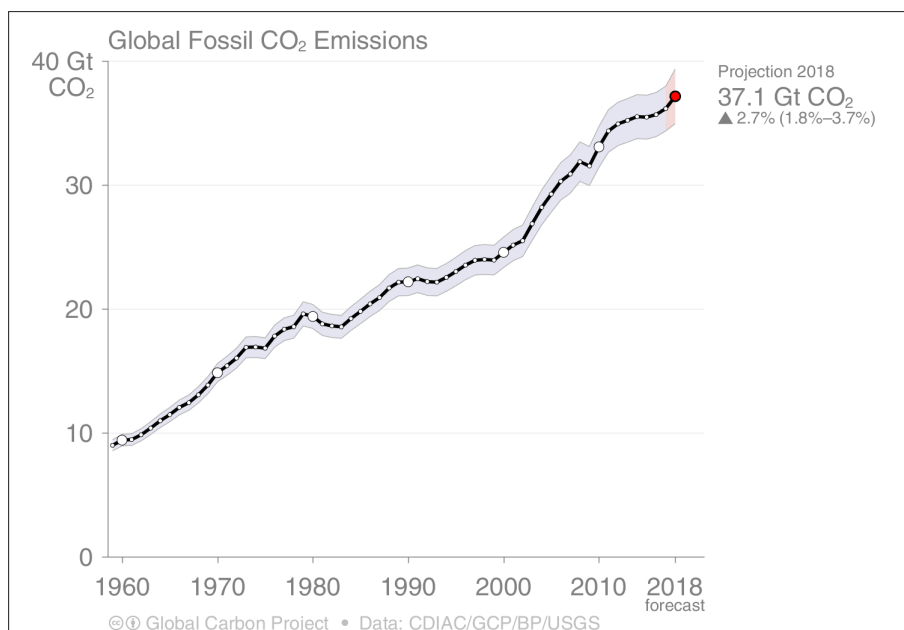
2.1 L'andamento delle emissioni di CO₂

Gli ultimi dati disponibili indicano che le emissioni di CO₂ hanno raggiunto a livello mondiale nel 2018 le 37,1 gigatonnellate (Gt) (Figura 1). Ed il picco non sembra ancora raggiunto. Tale aumento si associa ad un progressivo aumento della temperatura media (Figura 2).

Una suddivisione delle emissioni per paese (Figura 3) 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.

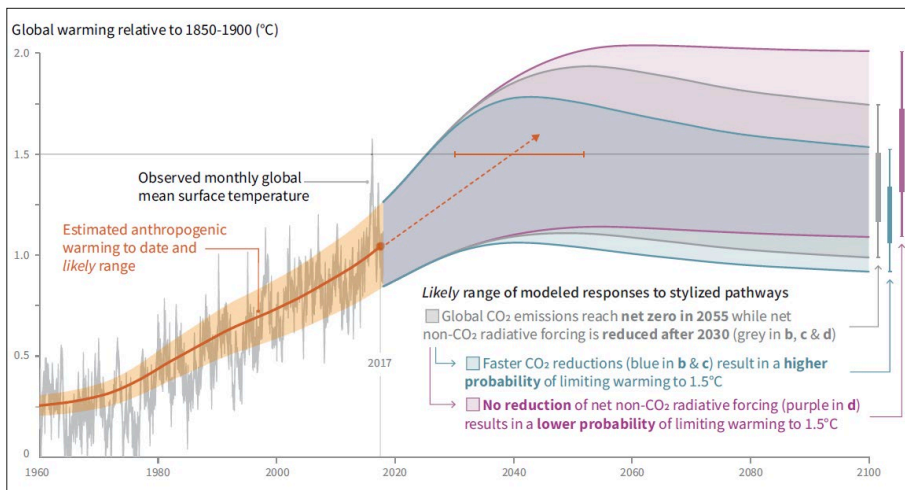
In termini pro-capite, gli Stati Uniti rimangono di gran lunga il paese che ha le emissioni più elevate (16 tonnellate pro-capite), tre volte di più della media mondiale. La Cina sembra attestarsi sulle 7 tonnellate pro-capite, superiore all'Italia. L'India è ancora a circa 2 tonnellate pro-capite.

Figura 1 – Emissioni mondiali di CO₂



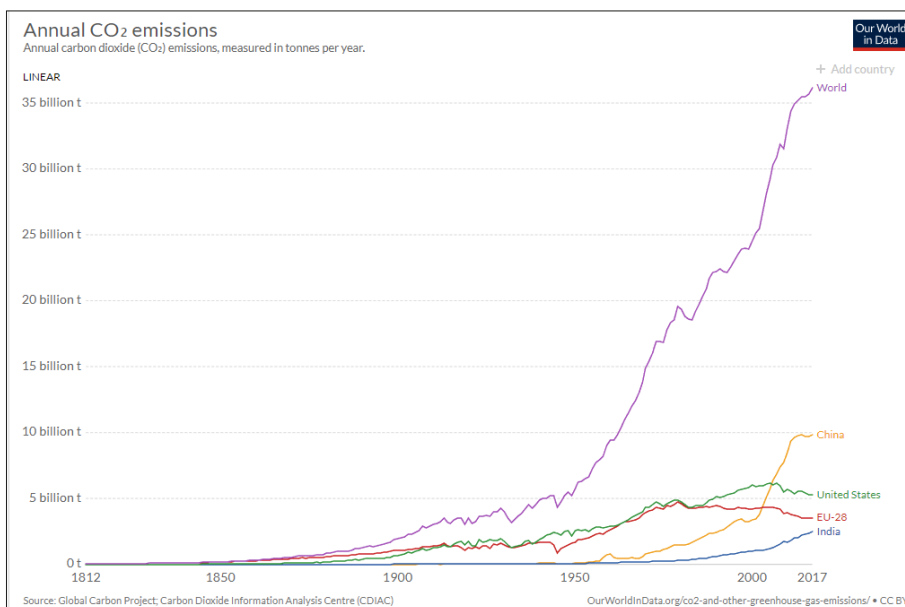
Fonte: Le Quéré *et al.*, 2018

Figura 2 – Andamento della temperature media mondiale rispetto ai livelli pre-industriali



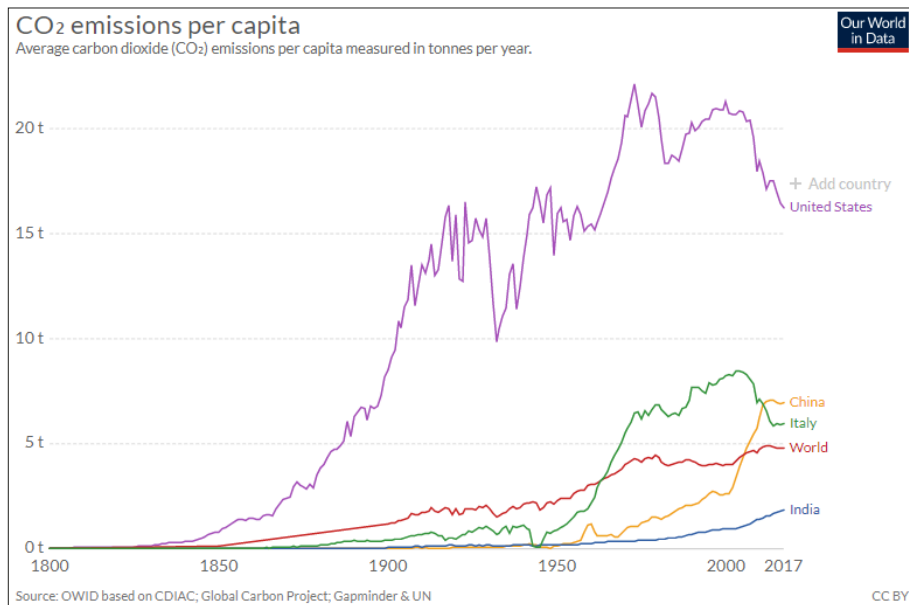
Fonte: IPCC – Summary for the policy makers <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Figura 3 – Emissioni mondiali di CO₂ per paese



Fonte: Our Word in Data, <https://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.ZS?end=2014&start=1960&view=chart> (Dati tratti da Le Quéré *et al.*, 2018)

Figura 4 – Emissioni mondiali di CO₂ pro-capite per paese



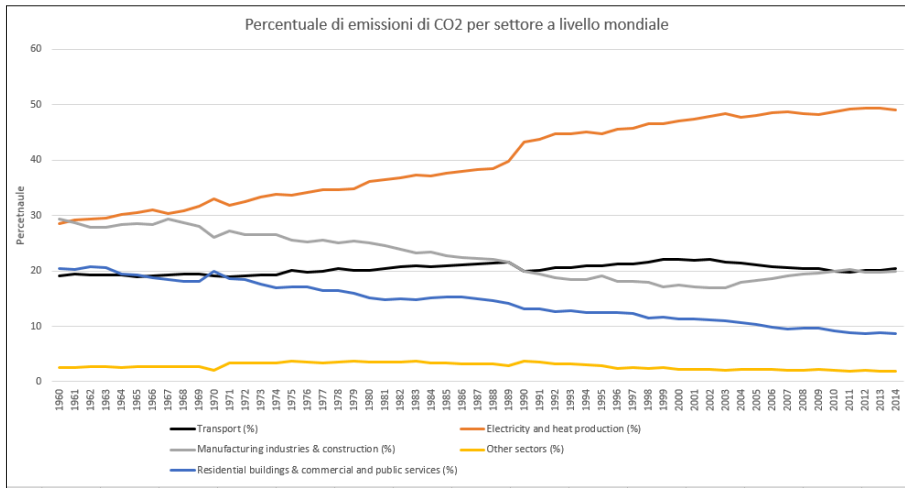
Fonte: Our World in Data – I dati sono tratti dal Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC); Gapminder and UN population estimates

2.2 Il contributo dei trasporti

Una prima idea del contributo dei trasporti alle emissioni di CO₂ si può avere dai dati di fonte Our World in Data in Figura 5 e Figura 6. La Figura 5 illustra le tendenze per settore a livello mondiale. Si può notare come i trasporti contribuiscono 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 pro-

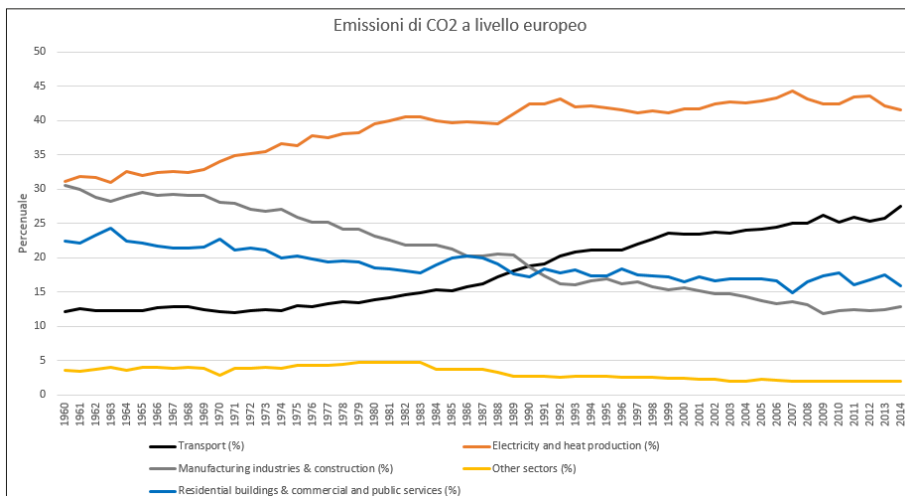
² Gota *et al.* (2017) forniscono una stima maggiore includendo il trasporto marittimo e l'aviazione internazionale. Essi sostengono che "the transport sector (including aviation and shipping) currently accounts for 7.5 Gt of CO₂ emissions (tank to wheel), about 28% of global final energy demand, 14%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

Figura 5 – Emissioni mondiali di CO₂ per settore



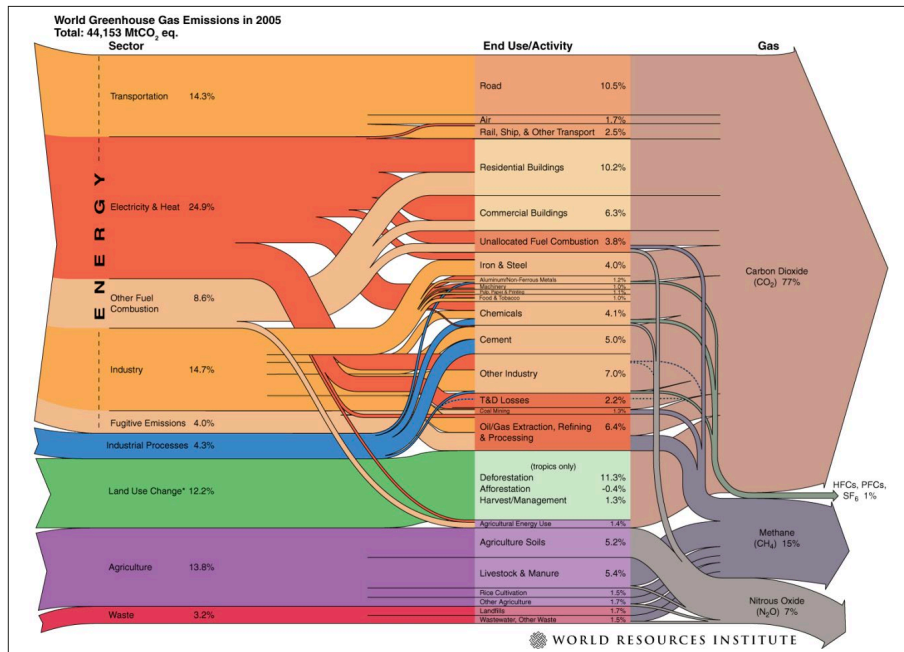
Fonte: Our World in Data,
<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>

Figura 6 – Emissioni di CO₂ per settore in Europa



Fonte: Our World in Data

Figura 7 – Emissioni di gas serra nel 2005 a livello mondiale



Fonte: World Resources Institute

duzione di energia elettrica e di calore si è stabilizzato (Figura 6). 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.

Per avere una idea più precisa del contributo dei trasporti, è utile intanto distinguere tra gas serra e CO₂: i gas serra sono principalmente composti da CO₂ (77%), ma comprendono anche il metano (CH₄, 15%) e il Nitrous Oxide (N₂O, 7%). Un altro termine frequentemente usato è quello di “CO₂ equivalente”,

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”.

che indica l'impatto sul riscaldamento globale di una certa quantità di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica (CO₂) e viene utilizzata per potere confrontare e sommare insieme i contributi di diversi gas serra.

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. Nella Figura 7 relativa al 2005, l'utilizzo della energia elettrica avveniva solo tramite il trasporto su rotaia. Al crescere del numero di auto elettriche in circolazione, tale contribuzione indiretta dei trasporti tramite l'energia elettrica è destinata ad aumentare.

2.2.1 Il contributo dei trasporti alle emissioni di CO₂ in Europa

Per avere una idea insieme più dettagliata e completa del contributo dei trasporti alle emissioni di CO₂ concentriamoci sui dati relativi all'Europa riportati in *Tavola 1*.

Si può notare come l'ammontare di GHG complessivo emesso nel 2017 sia stato pari a 4.323,2 milioni di tonnellate. Sono compresi tutti i settori, con l'esclusione dei LULUCF (*land use, land-use change and forestry*) e dei cosiddetti "memo items" (*transport and storage of CO₂, international bunkers, international aviation, international navigation*). Sempre nel 2017, quasi l'80% delle emissioni viene dai settori che bruciano combustibili per fini energetici (3.367 milioni di tonnellate). La combustione per il trasporto rappresenta il 22% del totale (945,9 milioni di tonnellate), un ammontare non lontano da quello prodotto nelle industrie dell'energia e per la produzione di elettricità pubblica e calore. Tale valore è per lo più dovuto al trasporto su strada (895,8 milioni di tonnellate), di cui più della metà per le automobili (543,2 milioni di tonnellate). Il trasporto delle merci su furgone o su camion emette un totale di 341,5 milioni di tonnellate.

Concentrandoci ora sui *memo item* – trattati a parte in quanto, avendo una dimensione internazionale, necessitano di una stima della componente – si nota

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.

Tavola 1 – Emissioni di gas serra in Europa (28 paesi) (dati in milioni di tonnellate)

AIREMSECT/TIME	2017	1990	2017/ 1990	2017	1990
CRF1-6X4_MEMO – All sectors (excluding LULUCF and memo items)	4.323,2	5.649,5	0,77	100%	100%
CRF1 – Energy	3.367,8	4.348,7	0,77	78%	77%
CRF1A – Fuel combustion – sectoral approach	3.281,6	4.155,6	0,79	76%	74%
CRF1A1 – Fuel combustion in energy industries	1.179,3	1.675,7	0,70	27%	30%
CRF1A1A – Fuel combustion in public electricity and heat production	1.007,0	1.437,1	0,70	23%	25%
CRF1A1B – Fuel combustion in petroleum refining	116,5	122,7	0,95	3%	2%
CRF1A1C – Fuel combustion in manufacture of solid fuels and other energy industries	55,8	115,9	0,48	1%	2%
CRF1A2 – Fuel combustion in manufacturing industries and construction	499,8	836,1	0,60	12%	15%
CRF1A3 – Fuel combustion in transport	945,9	793,2	1,19	22%	14%
CRF1A3A – Fuel combustion in domestic aviation	16,1	13,9	1,16	0%	0%
CRF1A3B – Fuel combustion in road transport	895,8	729,6	1,23	21%	13%
CRF1A3B1 – Fuel combustion in cars	543,2	461,0	1,18	13%	8%
CRF1A3B2 – Fuel combustion in light duty trucks	106,3	68,3	1,56	2%	1%
CRF1A3B3 – Fuel combustion in heavy duty trucks and buses	235,2	190,6	1,23	5%	3%
CRF1A3B4 – Fuel combustion in motorcycles	10,7	9,2	1,16	0%	0%
CRF1A3B5 – Fuel combustion in other road transportation	0,5	0,4	1,02	0%	0%
CRF1A3C – Fuel combustion in railways	6,6	14,2	0,47	0%	0%
CRF1A3D – Fuel combustion in domestic navigation	21,3	30,2	0,70	0%	1%
CRF1A3E – Fuel combustion in other transport	6,1	5,3	1,15	0%	0%
CRF1A4 – Other fuel combustion sectors	649,8	826,9	0,79	15%	15%
CRF1A5 – Other fuel combustion sectors n.e.c.	6,8	23,7	0,28	0%	0%
CRF1B – Fuels – fugitive emissions	86,2	193,0	0,45	2%	3%
<i>CRF1C – Transport and storage of CO₂ (memo item)</i>	:	:			
<i>CRF1D1 – International bunkers (memo item)</i>	304,0	179,9	1,69	7%	3%
<i>CRF1D1A – International aviation (memo item)</i>	158,3	69,1	2,29	4%	1%
<i>CRF1D1B – International navigation (memo item)</i>	145,8	110,7	1,32	3%	2%
CRF2 – Industrial processes and product use	377,5	517,2	0,73	9%	9%
CRF3 – Agriculture	439,0	543,3	0,81	10%	10%
CRF4 – Land use, land use change, and forestry (LULUCF)	-258,1	-245,0	1,05	-6%	-4%
CRF5 – Waste management	138,9	240,4	0,58	3%	4%

Greenhouse gases (CO₂, N₂O in CO₂ equivalent, CH₄ in CO₂ equivalent, HFC in CO₂ equivalent, PFC in CO₂ equivalent, SF₆ in CO₂ equivalent, NF₃ in CO₂ equivalent), Million tonnes, <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

come i bunkeraggi, la navigazione ed il trasporto aereo a livello internazionale siano molto rilevanti emettendo nel 2017 un valore pari a 608,1 milioni di tonnellate, ovvero il 14% del totale. Complessivamente, quindi, i trasporti sono responsabili in Europa del 36% delle emissioni di CO₂.

Confrontando il 2017 con il 1990, si osserva anche che, 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%). Guardando nel dettaglio, 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.

In particolare in Europa, quindi, i trasporti, muovendosi in contro-tendenza rispetto agli altri settori, rivestono un ruolo molto rilevante nel generare emissioni di CO₂. Ridurre le emissioni di CO₂ dai trasporti rappresenta quindi una pre-condizione fondamentale per ridurre ulteriormente le emissioni di CO₂ in Europa.

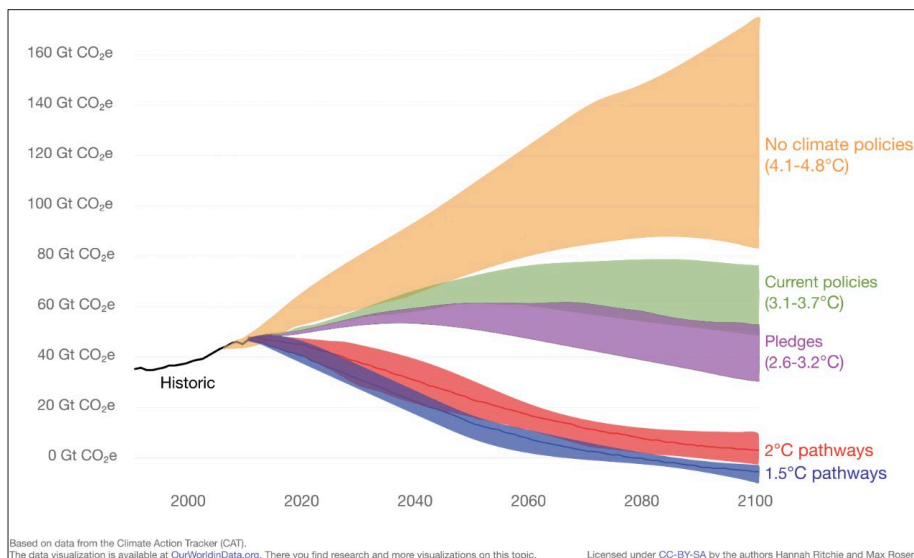
2.3 Previsioni

2.3.1 Previsioni globali

Our world in Data propone i seguenti 5 scenari globali basati sul Climate Action Tracker (<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#future-emission-scenarios>):

- *No climate policies*: se non fossero state attuate politiche climatiche, le emissioni future previste comporterebbe un riscaldamento stimato di 4,1-4,8° C entro il 2100 (rispetto alle temperature preindustriali);
- *Current climate policies*: riscaldamento previsto di 3,1-3,7° C entro il 2100 sulla base delle attuali politiche climatiche attuate;
- *National pledges*: se tutti i paesi raggiungessero i loro attuali obiettivi/impegni fissati nell'ambito dell'accordo sul clima di Parigi, il riscaldamento medio stimato di 2100 sarebbe di 2,6-3,2° C. Ciò andrebbe ben oltre l'obiettivo generale dell'accordo di Parigi di mantenere il riscaldamento "ben al di sotto dei 2° C";
- *2°C consistent*: ci sono una serie di scenari di emissione compatibili con la limitazione del riscaldamento medio a 2° C entro il 2100. Richiedono però un aumento significativo degli impegni previsti dall'accordo di Parigi;

- **1.5°C consistent:** la limitazione del riscaldamento medio a 1,5° C entro il 2100 richiede una riduzione molto urgente e rapida delle emissioni globali di gas a effetto serra.



2.3.2 Previsioni per il settore dei trasporti

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 gigatonnelate (Gt) annuali del 2013 a 13 Gt entro il 2050. Dal 2010 al 2050, in uno scenario

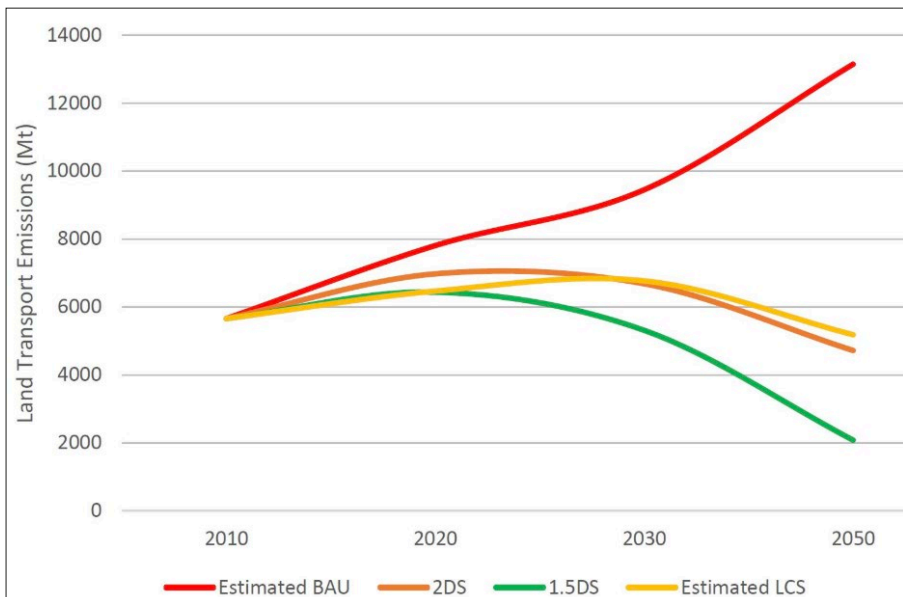
BAU, si prevede che le emissioni del settore dei trasporti nei paesi non OCSE aumentino di quasi tre volte (295%) mentre le analoghe emissioni nei paesi OCSE dovrebbero aumentare solo leggermente (17%).

L'applicazione delle politiche di riduzione delle emissioni (*Low carbon strategy, LCS*) porterebbe le emissioni lungo la linea gialla che è vicina a quella coerente con l'obiettivo 2DS (emissioni di 4,7 Gt) ma insufficiente per ottenere l'obiettivo 1.5DS (emissioni di 2 Gt).

L'analisi delle politiche proposte evidenzia che:

- I Paesi OCSE ed i Paesi non OCSE mostrano una mitigazione dei trasporti potenzialmente comparabile;
- Le politiche di trasporto passeggeri hanno circa tre volte più probabilità di essere utilizzate come opzioni di mitigazione rispetto alle politiche di trasporto merci, sebbene le merci causino circa il 40% delle emissioni globali dei trasporti;
- Nelle strategie nazionali di mitigazione proposte, le strategie di "improve" (ad es., elettrificazione dei veicoli) sono più citate (rappresentano circa il 61% delle azioni) rispetto alle strategie di "avoid" (ad es. riduzione della necessità

Figura 8 – Previsione della istituto SLoCaT (2016) rispetto ai trasporti terrestri



<http://www.ppmc-transport.org/implications-of-2ds-and-1-5ds-for-land-transport-carbon-emissions-in-2050/>

di spostarsi) (circa il 19%) e di "shift" (ad es. miglioramento del trasporto pubblico (circa il 19%) o combinazioni di queste (circa 1%). Un maggiore approfondimento su classificazione ed efficacia delle politiche è presente nella sezione 4 di questo volume.

Le previsioni del ITF *Transport Outlook* (2017) sono anche molto preoccupanti (Figura 10). Prevedono che le emissioni dei trasporti possono aumentare mediamente del 60% in uno scenario BAU. Per il trasporto merci è previsto una

Figura 9 – Composizione delle politiche di riduzione delle emissioni proposte nei 450 studi esaminati da Gota *et al.* (2016)

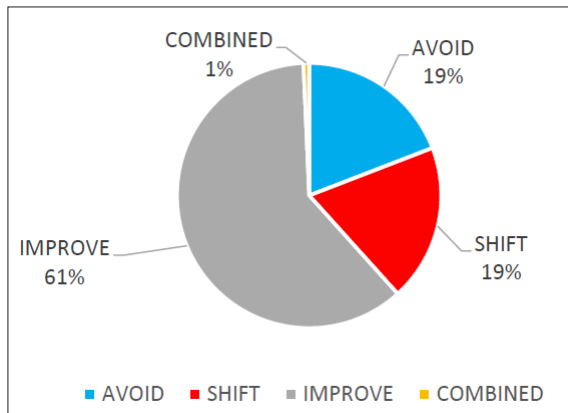
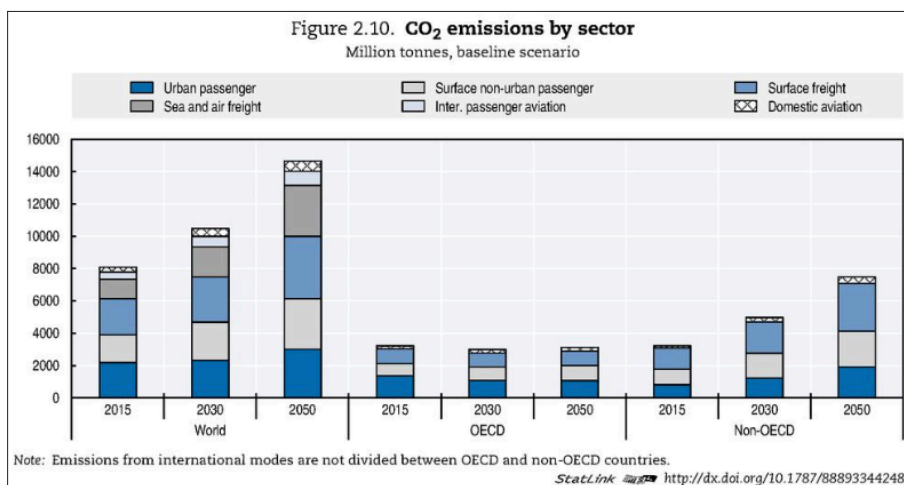


Figura 10 – Emissioni nel settore dei trasporti previste da IFT (2017)



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.

3. LE TENDENZE IN ATTO NEL TRASPORTO DELLE PERSONE E DELLE MERCI

Di seguito riportiamo alcuni dati statistici sulle tendenze in atto nel trasporto delle persone e delle merci. Purtroppo i dati non sono omogenei. I dati a livello mondiale sono molto carenti, per cui ricorremo a dati europei, quando disponibili, se non a dati relativi all'Italia, e ad altre fonti. In ogni caso, i dati indicano abbastanza chiaramente le tendenze in atto e riflettono anche l'impatto delle politiche messe in atto in Europa ed in Italia.

3.1 *Passeggeri*

Come abbiamo visto, 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, legate anche alla dispersione residenziale e commerciale. Non essendoci dati sulle percorrenze a livello europeo, ci limitiamo a riportare i dati disponibili per l'Italia. Nel Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, la tavola 2 e la tavola 3 ci mostrano che mentre il traffico di merci è molto calato rispetto al 2005, a seguito della crisi economica del 2008, il traffico di passeggeri si è ampiamente ripreso, con una dinamica di crescita molto elevata proprio nell'autotrasporto privato.

⁵ In Italia, ad esempio, il parco autovetture 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).

Nei prossimi paragrafi esaminiamo le tendenze in atto nel trasporto distinguendo per lunghezza del viaggio, ricorrendo ad evidenze empiriche italiane o internazionali, al fine di valutare se esistono opportunità di riduzione delle emissioni di CO₂.

Tavola 2 – Traffico totale interno di merci – Anni 2005, 2010, 2015-2017
(milioni di tonnellate-km)

MODALITÀ DI TRASPORTO	2005	2010	2015	2016	2017
Trasporti ferroviari	22.761	18.616	20.781	22.712	22.251
Navigazione marittima di cabotaggio	46.839	53.156	51.145	56.713	58.098
Navigazione interna	89	135	62	67	68
Navigazione aerea	982	1.013	1.085	1.166	1.274
Autotrasporto (> 50 Km)	155.872	134.261	95.513	92.296	95.548
Oleodotti (> 50 Km)	10.907	9.606	8.790	9.599	9.853
Totale	237.450	216.787	177.376	182.553	187.092

Fonte: adattata da Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018)

Tavola 3 – Traffico totale interno di passeggeri – Anni 2005, 2010, 2015-2017
(milioni di passeggeri-km)

MODALITÀ DI TRASPORTO	2005	2010	2015	2016	2017
Impianti fissi	50.463	47.574	52.695	53.003	53.801
Trasporti collettivi extraurbani	89.329	90.134	91.559	92.043	92.048
Trasporti collettivi urbani	17.678	19.188	17.802	17.749	17.898
Navigaz. marittima di cabotaggio	3.237	3.561	2.987	2.918	2.981
Navigazione interna	488	527	603	636	655
Navigazione aerea	12.813	15.726	17.802	18.647	19.811
Autotrasporti privati	726.534	739.870	717.675	744.931	782.780
– di cui autovetture	677.014	698.390	676.350	704.542	744.919
– di cui motocicli e ciclomotori	49.521	41.480	41.326	40.389	37.860
Totale	900.541	916.581	901.124	929.928	969.974

Fonte: adattata da Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018)

Tavola 4 – La distribuzione della domanda di mobilità per classi di lunghezza degli spostamenti (valori %)

	Spostamenti			Passeggeri*km		
	2017	2016	2001	2017	2016	2001
Prossimità (fino a 2 km)	34,7	27,6	38,6	4,2	3,3	5,7
Scala urbana (2-10 km)	41,8	46,0	42,5	23,1	23,1	27,5
Medio raggio (10-50 km)	21,3	23,5	17,1	43,3	45,3	42,1
Lunga distanza (oltre 50 km)	2,3	2,9	1,8	29,4	28,3	24,7
<i>Totale</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>

Fonte: Isfort (2018), Osservatorio “Audimob” sulla mobilità degli italiani

3.1.1 Distanze brevi e mobilità urbana

Molta mobilità, in particolare quella urbana, ha luogo su distanze brevi (Tavola 4). 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 (Tavola 5), 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 abbastanza realistico concludere che non possiamo aspettarci cambiamenti importanti nelle modalità di spostamento delle persone, data la difficoltà di alterare in modo significativo ed in tempi rapidi l'assetto urbanistico e le abitudini e le esigenze di mobilità delle persone⁶.

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

Tavola 5 – La distribuzione di tutti gli spostamenti per mezzi di trasporto utilizzati (valori %)

	2017	2016	2008	2001
Piedi	22,3	17,1	17,5	23,1
Bici	5,2	3,3	3,6	3,8
Moto	3,0	3,0	4,5	5,7
Auto	58,6	65,3	63,9	57,5
<i>di cui come passeggero</i>	<i>12,3</i>	<i>8,5</i>	<i>7,6</i>	<i>8,0</i>
Trasporto pubblico	7,0	6,6	6,1	7,8
Combinazioni di mezzi (e altro)	3,9	4,6	4,5	2,3
<i>Totale</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>

Fonte: Isfort (2018), Osservatorio “Audimob” sulla mobilità degli italiani

Dalle strategie “avoid” o “shift”, che discuteremo in dettaglio nel paragrafo 4.0, non ci si può aspettare grossi contributi alla riduzione delle emissioni di CO₂. Resta, a nostro parere, la strategia “improve”, legata al miglioramento tecnologico dei veicoli e dei carburanti, che esamineremo nel paragrafo 5.0.

3.1.2 Mobilità interurbana: medie e lunghe distanze

Siccome non esistono dati relativi ai soli viaggi sulle distanze medie-lunghe, utilizziamo i dati desunti da Eurostat sulla distribuzione modale nel trasporto passeggeri in complesso, che includono anche le brevi distanze.

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 presentate 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%,

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.

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.

Tavola 6 – Distribuzione modale nel trasporto passeggeri nel 2007 e nel 2016
(Fonte: Eurostat)

GEO/VEHICLE	2007			2016		
	TRENO	AUTO	BUS E CORRIERE	TRENO	AUTO	BUS E CORRIERE
European Union – 28 countries	7.1	83.1	9.8	7.7	82.9	9.4
Belgium	7.1	78.8	14.1	7.7	81.8	10.5
Bulgaria	4.4	73.8	21.8	2.2	83.7	14.1
Czechia	7.3	75.7	17	8.9	74	17.1
Denmark	9.7	79.6	10.7	8.6	81.6	9.8
Germany (until 1990 former territory of the FRG)	7.8	85.7	6.5	8.6	85.7	5.8
Estonia	2.1	77.2	20.7	2	80.1	17.9
Ireland	3.4	82.3	14.2	2.9	79.9	17.2
Greece	1.6	79.9	18.5	1	81.9	17.1
Spain	5	81	14	6.6	81.6	11.8
France	9.6	84.9	5.5	9.7	81.5	8.8
Croatia	5	82.9	12.1	2.7	85	12.3
Italy	6	81.6	12.4	6.1	81.9	12
Cyprus	:	80.3	19.7	:	81.4	18.6
Latvia	4.9	79.4	15.7	3.4	81.5	15.1

Lithuania	0.6	91	8.4	1	89.9	9.1
Luxembourg	4.1	84.9	11.1	4.6	83.1	12.3
Hungary	11	67.6	21.5	9.3	69	21.7
Malta	:	80.6	19.4	:	82.6	17.4
Netherlands	9.6	87.5	2.9	11	86	3
Austria	10	78.9	11.1	12.1	77.7	10.2
Poland	8.5	70.7	20.8	7.3	78.5	14.2
Portugal	4.1	89.4	6.5	4.2	89.1	6.7
Romania	8.6	77.5	14	4.2	80.1	15.7
Slovenia	2.6	86	11.4	2	86.3	11.8
Slovakia	6	72	22	9.4	74.8	15.8
Finland	5	84.9	10	5.6	82.5	11.9
Sweden	7.9	84.9	7.2	9.3	83.5	7.2
United Kingdom	6.6	87.9	5.5	8.8	86.5	4.6
Iceland	:	88.6	11.4	:	88.6	11.4
Norway	4.6	88.7	6.7	5.1	89	5.9
Switzerland	17	77.4	5.5	19.8	74.3	5.9
North Macedonia	2.1	77.8	20.1	1	85.9	13.1

3.2 *Il trasporto delle merci*

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. 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.

Tavola 7 – Distribuzione modale nel trasporto merci nei paesi europei nel 2008 e nel 2017
(Fonte: Eurostat)

GEO/TRA_MODE	2008			2017		
	Railways	Roads	Inland waterways	Railways	Roads	Inland waterways
European Union – 28 countries	18.1	75.5	6.5	17.3	76.7	6
Belgium	13.7	72.8	13.5	10.7	73.7	15.6
Bulgaria	23.2	48.2	33.2	18.5	56.6	24.9
Czechia	32.2	67.8	0.1	26.9	73.1	0
Denmark	9	91	:	11.5	88.5	:
Estonia	68.2	31.8	:	44.4	55.6	:
Germany	19.3	70	10.7	17.8	73.4	8.8
Ireland	0.7	99.3	:	0.9	99.1	:
Greece	2.9	97.1	:	1.8	98.2	:
Spain	4.8	95.2	:	5.1	94.9	:
France	11.5	85.9	2.5	10.5	87.2	2.4
Croatia	22.6	71.7	5.7	20.1	73.6	6.3
Italy	11.3	88.7	0	13.6	86.4	0
Cyprus	:	100	:	:	100	:
Latvia	83.4	16.6	:	74	26	:
Lithuania	73	27	0.1	66.7	33.3	0
Luxembourg	9.9	77	13.1	6.3	87.9	5.8
Hungary	25.1	69.1	5.7	32.4	62.7	4.8
Malta	:	100	:	:	100	:
Netherlands	6.7	49.1	44.2	5.9	49.4	44.7
Austria	33.6	62.8	3.6	31.8	65.4	2.9
Poland	33.8	66	0.2	23.9	76	0.1
Portugal	9.7	90.3	:	14.1	85.9	:
Romania	25.3	51.4	25.8	30.2	42.4	27.4
Slovenia	29.7	70.3	:	35.5	64.5	:
Slovakia	40.3	54.9	4.8	32.9	63.5	3.6
Finland	27.2	72.6	0.2	27.3	72.4	0.3

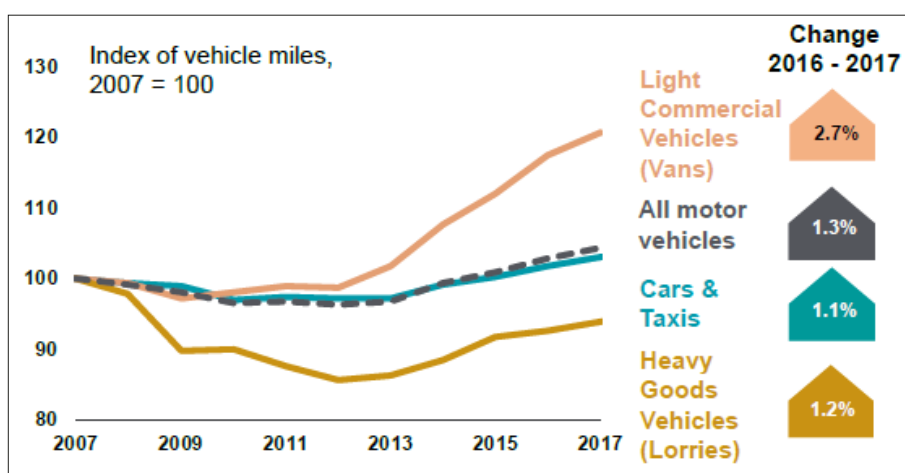
Sweden	31.9	68.1	:	30.2	69.8	0
United Kingdom	11.2	88.8	0.1	9.6	90.4	0.1
Norway	15.6	84.4	:	15.2	84.8	:
Switzerland	35.5	64.4	0.1	34.7	65.1	0.1

3.2.1 Distribuzione urbana delle merci

Sulla distribuzione urbana delle merci, ci serviamo, tra i pochi dati disponibili, di quelli relativi al Regno Unito (Figura 11) da cui ricaviamo una evidenza empirica molto 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

Figura 11 – UK Department for Transport (Luglio 2018) Statistical Release – Annual Road Traffic Estimates



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)

3.2.2 *Trasporto internazionale delle merci e trasporto marittimo*

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, si ottengono gli andamenti rappresentati in Figura 12. 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, si passa alle stime illustrate in Figura 13, che indicano 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.

Con particolare riferimento al trasporto marittimo internazionale, Halim *et al.* (2018) individuano quattro possibili cosiddetti "sentieri di carbonizzazione" che permetterebbero di ridurre enormemente (fino al 95%) le emissioni di CO₂ dal trasporto marittimo (Tavola 8) grazie a miglioramenti tecnologici derivanti dalla combinazione di tre categorie di strumenti:

- Strumenti tecnologici: materiali leggeri, design snello, riduzione dell'attrito, recupero del calore residuo;

- Strumenti operativi: velocità inferiori, dimensioni della nave, interfaccia nave-porto;
- Combustibili/energia alternativi: biocarburanti sostenibili, idrogeno, ammoniacale, celle a combustibile, navi elettriche, assistenza eolica, energia solare.

Figura 12 – Scenari di incremento dei volumi di trasporto internazionale per modalità secondo IFT (2017), <http://dx.doi.org/10.1787/888933442530>

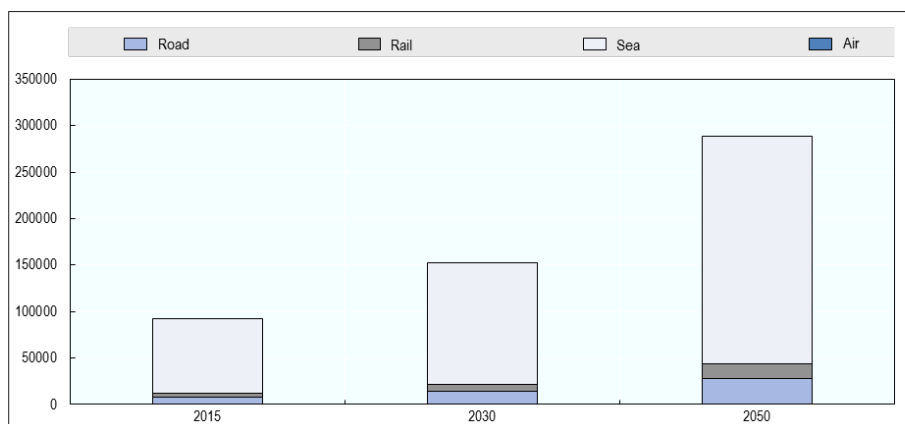


Figura 13 – Scenari di incremento delle emissioni di CO2 dipendenti dall'andamento dei volumi di trasporto internazionale per modalità secondo IFT (2017), <http://dx.doi.org/10.1787/888933442549>

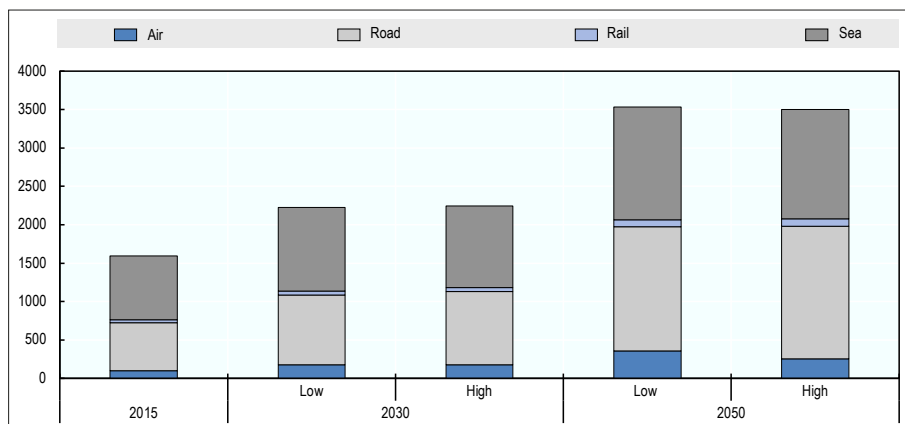


Tavola 8 –Riduzioni potenziali delle emissioni di CO₂ al 2025 tramite 4 sentieri di decarbonizzazione

	Riduzioni di CO ₂ (milioni tonn)	Riduzione %
Maximum intervention	810	95
Zero-carbon technology	798	93
Ultra-slow operation	698	82
Low-carbon technology	731	86

Tratto da Halim *et al.* (2018, p. 20)

Secondo Halim *et al.* (2018), è possibile ottenere una radicale riduzione della CO₂ derivante dal trasporto marittimo, anche se le misure da intraprendere potrebbero determinare un aumento dei suoi costi, che però Halim *et al.* (2018) prevedono non molto consistente. Quali sono le barriere all'introduzione nel settore delle misure di miglioramento tecnologico previste in questi quattro "sentieri di decarbonizzazione"? Halim *et al.* (2018) individuano le seguenti:

- costi sommersi e dipendenza dal percorso: nell'implementazione di tecnologie innovative gli armatori sopportano dei rischi economici che rendono più difficile passare a una flotta più efficiente dal punto di vista energetico;
- emissioni di carbonio come esternalità negativa: il combustibile usato per il trasporto marittimo non è tassato ed il costo delle emissioni di CO₂ non è internalizzato;
- incentivi divergenti: in molti casi il noleggiatore e l'armatore hanno incentivi divergenti. I costi del carburante sono a carico del noleggiatore, mentre il costo di acquisto delle navi è a carico degli armatori che hanno poco interesse a incorrere a costi elevati per costruire navi più efficienti;
- informazioni imperfette e asimmetria informativa: esse riguardano sia i costi operativi che le politiche di internalizzazione dei costi esterni;
- accesso ai finanziamenti: gli armatori devono convincere i finanziatori che i maggiori costi connessi alle navi più innovative saranno coperti.

Per superare queste barriere, Halim *et al.* (2018) sottolineano l'importanza delle azioni dei governi, i quali possono: a) fornire l'infrastruttura necessaria nei porti (per impianti di alimentazione a terra, ricarica elettrica e sistemi e impianti di bunkeraggio per carburanti alternativi); b) stimolare la ricerca e lo sviluppo di tecnologie cosiddette "verdi"; c) supportare programmi di finanza "verde" per

stimolare la navigazione sostenibile; d) incoraggiare le compagnie a valutare l'impronta di carbonio della catena di approvvigionamento; e) introdurre una fiscalità differenziata per ridurre il divario di prezzo tra combustibile convenzionale e quello "verde", utilizzandone i proventi per un'ulteriore decarbonizzazione del settore o per compensare potenziali impatti commerciali negativi nei paesi in via di sviluppo. Naturalmente, trovare un accordo tra i paesi per applicare queste politiche in modo coordinato a livello internazionale è tutt'altro che agevole.

3.2.3 Trasporto aereo internazionale

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 (Figura 14): 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

Figura 14 – Scenari di aumento della domanda di trasporto aereo internazionale, <http://dx.doi.org/10.1787/888933442672>

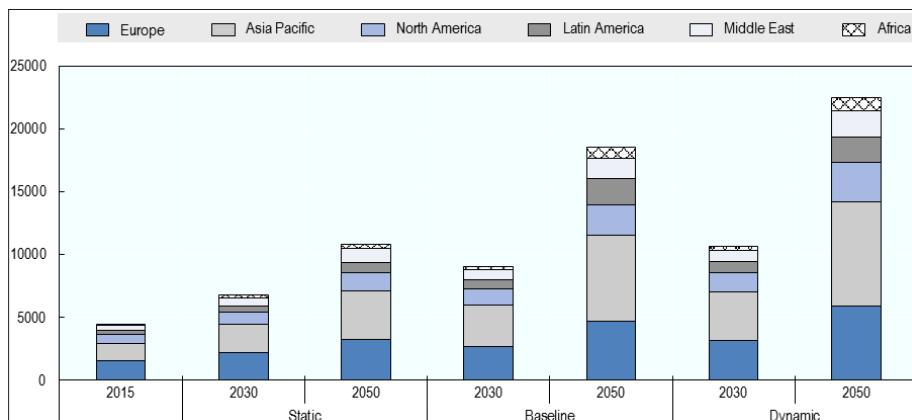
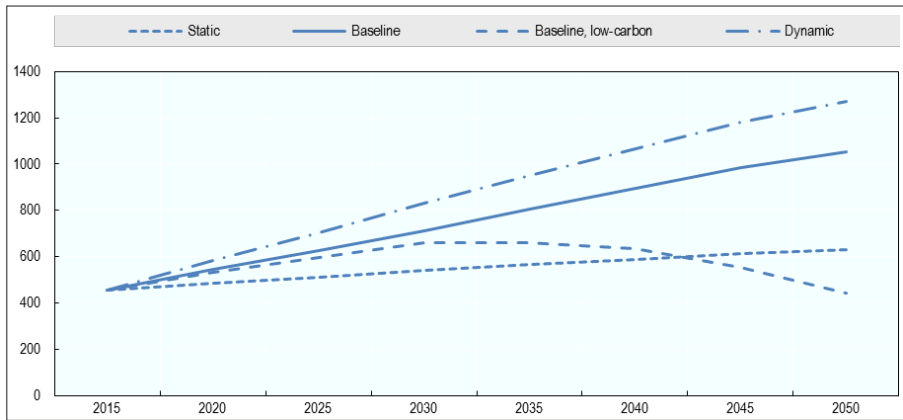


Figura 15 – Scenari di aumento delle emissioni di CO₂ dal trasporto aereo internazionale, <http://dx.doi.org/10.1787/888933442706>



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 gli scenari di aumento di CO₂ illustrati in Figura 15.

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; Chiamonti, 2019).

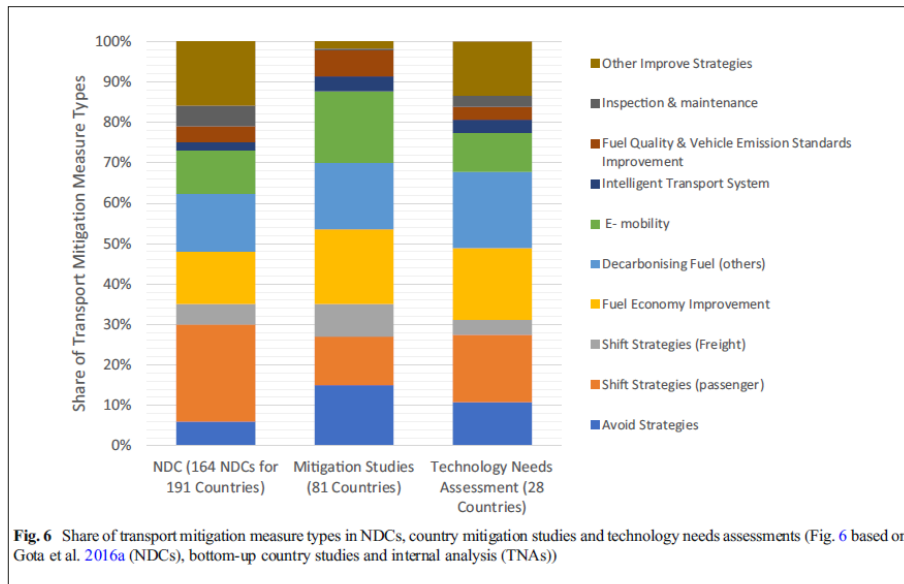
4. POLITICHE

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. Gota *et al.* (2017) illustra in Figura 16 alcune tipologie di politiche di decarbonizzazione.

Figura 16 – Suddivisione delle politiche di decarbonizzazione per tipologia



Il Paris Process on Mobility and Climate (PPMC, <http://www.ppmc-transport.org/>), un insieme di associazioni impegnate a contribuire a ridurre le emissioni di CO₂ dei trasporti, propone una serie di interventi classificati come raffigurato in Figura 17, contenente le seguenti componenti:

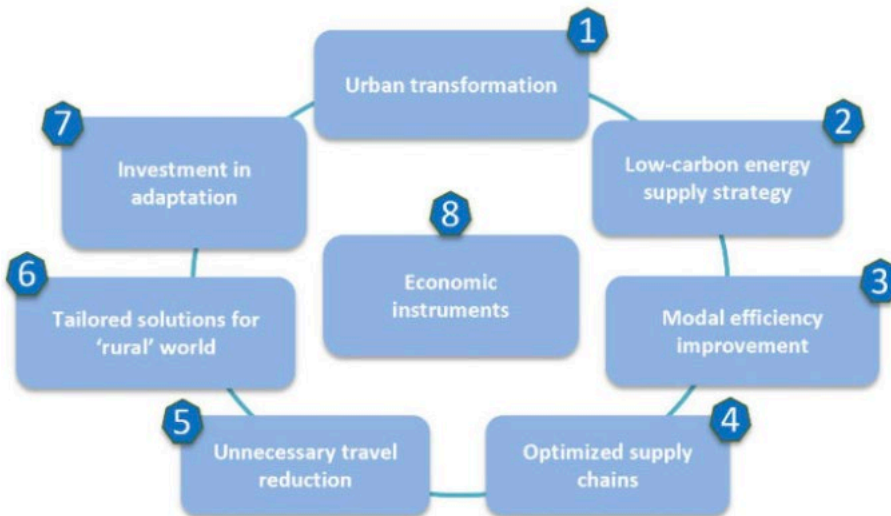
- Component 1: Urban transformation for healthier, inclusive lifestyles and efficient, resilient, prosperous cities;
- Component 2: Low-carbon energy supply strategy;
- Component 3: Improve modal and system efficiencies;
- Component 4: Optimize supply chains to manage freight transport emissions;
- Component 5: Avoid vehicle kilometres for commuting, shopping and accessing services;

- Component 6: Provide low-carbon solutions for the rural (non-urban) populations;
- Component 7: Accelerate action on adaptation in the transport sector;
- Component 8: Large scale deployment of economic instruments to catalyse the transformation, including putting a price on GHGs.

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, rimane 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. Sulla base dei dati che

Figura 17 – Global Macro Roadmap
<http://www.ppmc-transport.org/global-macro-roadmap/>



abbiamo sopra riportato, sembra potersi concludere che le strategie *avoid e shift* abbiano fornito risultati deludenti in passato e, pertanto, non si vede come e perché si possa affidare a queste strategie speranze di risultati migliori per il futuro, a meno di non alterare in modo sostanziale, tramite gli strumenti fiscali, il quadro competitivo tra le modalità, cosa che però porterebbe a grossi problemi di accettabilità politica⁷. 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.

4.1 *Carbon pricing*

Il *Carbon pricing* è definito come un insieme di strumenti che comprendono, in senso stretto, la tassa sul carbonio (*Carbon Tax*) e i diritti di emissione (*Emission Trade Scheme* o ETS) e, in senso allargato, secondo Lepratti *et al.* (2017), anche i *climate bonds*. 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 definiti come 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, la definizione del-

⁷ Ad una simile conclusione giungono anche Eisenkopf and Knorr (2018).

la tassa sul carbonio non garantisce un livello certo di riduzione delle emissioni, in quanto non si 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 pianificazione 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 o meno costose rispetto alle politiche regolatorie, quali standards o prescrizioni. Essi 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 equalizzati 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. 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 industrie siderurgiche, dei prodotti minerali, della ceramica, della carta e dell'aviazione civile. 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 edifici⁸. 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 scendere⁹.

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 su materie che sono 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

⁸ 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>

⁹ 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.

auto diesel che su quelle a benzina. I criteri sono i più diversi e differiscono tra Stati. Inoltre, il criterio 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 istituti di ricerca 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 di quanto questi strumenti modificherebbero i comportamenti delle persone. Probabilmente di poco nel breve periodo, e di molto nel lungo periodo. Gli economisti verificano questi impatti stimando l'elasticità della domanda. L'evidenza empirica che abbiamo presentato più sopra ci fa du-

bitare che i comportamenti e le scelte modali possono modificarsi, 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. La qualcosa 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, 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 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 anno¹⁰. Per questo, è necessario usare, oltre che strumenti di prezzo, anche strumenti di regolazione quali gli standard di emissioni.

4.2 Standard di emissione

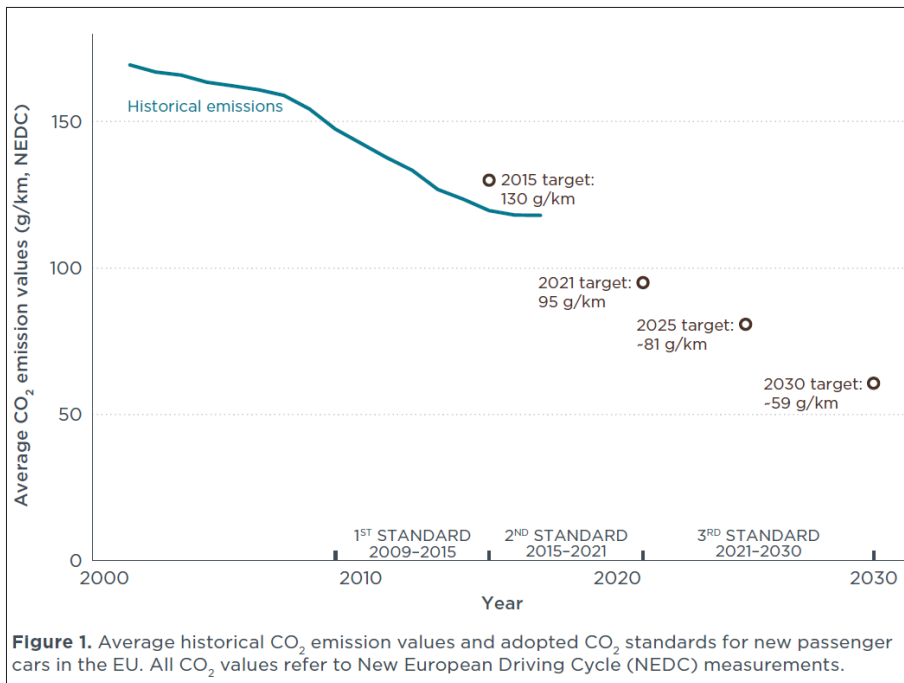
Uno standard di emissione di un veicolo stabilisce soglie massime da rispettare pena sanzioni finanziarie e non. È lo strumento più comunemente usato a livello internazionale per contenere le emissioni e per incentivare i produttori dei veicoli a migliorare le tecnologie dei motori. Come vedremo nel 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 e sono

¹⁰ 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>

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 VIb,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 CO_2 propriamente un inquinante, l'emissione della CO_2 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 CO_2 è del 2009.

La Figura 18 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 CO_2 e consu-

Figura 18 – Andamento delle emissioni medie effettive e livelli obiettivo per le auto immatricola in Europa. Valori CO_2 sulla base del NEDC



Fonte: ICCT (2019)

mo di carburante, raggiungere un obiettivo di minori emissioni medie significa in primo luogo ma non solo, come vedremo tra poco, ridurre i consumi di combustibile per km percorso, tramite motori più efficienti o veicoli più leggeri. Si noti come le emissioni medie effettive 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 9 per le auto e nella Tavola 10 per i furgoni.

Tavola 9 – 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 10 – 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	1,659	129	171	137	0.6%
Citroën	0.10	1,647	129	170	136	0.5%
Renault	0.15	1,675	145	172	138	1.7%
Fiat	0.09	1,707	152	175	141	0.0%
VW	0.11	1,842	160	188	154	0.1%
Opel	0.03	1,738	163	178	144	0.0%
Ford	0.16	1,949	166	198	165	0.0%
Nissan	0.03	1,883	167	191	158	4.9%
Mercedes-Benz	0.09	2,004	191	203	170	0.0%
Iveco	0.03	2,255	209	226	194	0.0%
Media		1,798	156	175	147	0.8%

Fonte: ICCT (2019)

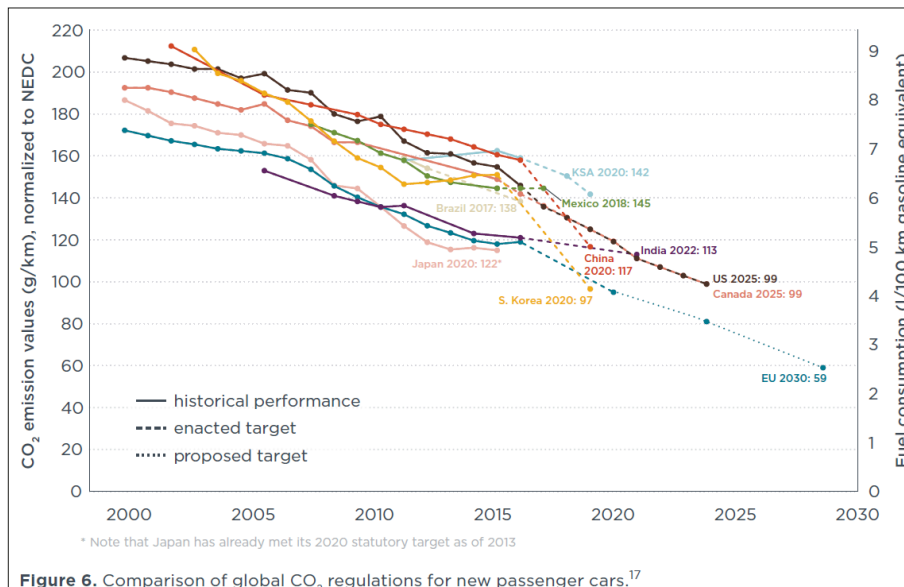
Come si può vedere, la media per i principali produttori di automobili nel 2017 è 119 g/km, ben al di sotto dell'obiettivo medio del 2015 (130 g/km). Analogamente per i furgoni. Il 17 aprile 2019, il Parlamento europeo e il Consiglio – dopo lunga e tormentata discussione che ha visto diversi paesi dissenzienti 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 19). Come si può vedere dalla Tavola 9 e dalla Tavola 10, i target fissati per il 2021 sono piuttosto ambiziosi e richiederanno un notevole impegno a tutti i costruttori¹¹.

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

¹¹ 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 19 – 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.

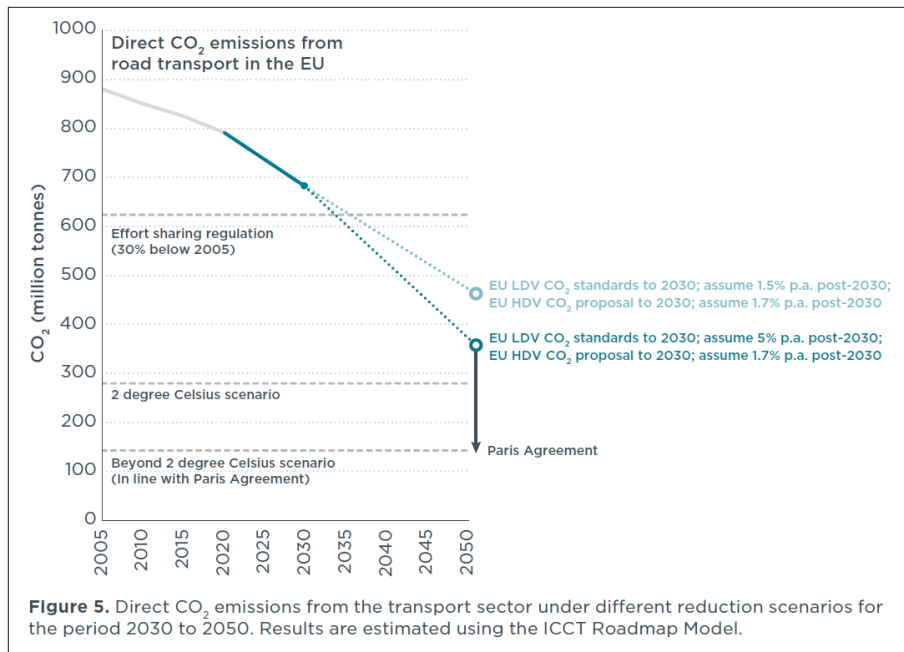
Queste opportunità, la norma che si applica alla flotta e non al singolo veicolo e il sistema dei supercrediti e quello del raggruppamento di produttori, per quanto presentino diversi elementi critici ed arbitrari evidenziati in letteratura¹², consentono alle case produttrici una maggiore flessibilità 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.

Quale sarà il probabile effetto della riduzione dei limiti di emissione? ICCT (2019) propone la stima rappresentata nella Figura 20. Le proiezioni al 2030 considerano gli impatti del regolamento post-2020 per le autovetture e i furgoni (LDV) e gli standard proposti per i veicoli pesanti (HDV) nel maggio 2018. Risulta che le emissioni dirette di CO₂ da trasporto su strada nell'UE rimarrebbero al di sopra dei livelli necessari per soddisfare gli obiettivi 2030 per i settori non ETS. Per raggiungere l'obiettivo del 2030, sarebbero quindi necessarie ulteriori misure per ridurre le emissioni del settore dei trasporti, in modo compensativo, nei settori ETS. Dopo il 2030, si assume in un primo scenario che le emissioni di CO₂ siano ridotte annualmente ad un tasso dell'1,5% per le nuove autovetture e veicoli commerciali leggeri, e ad un tasso del 1,7% per i camion. In un secondo scenario si assume che le nuove autovetture e veicoli commerciali leggeri riducano le emissioni ad un tasso annuo del 5%. Le emissioni annuali nel 2050 verrebbe in questo modo ridotte di ulteriori 100 milioni di tonnellate di CO₂; pur tuttavia nessuno dei due scenari ottiene un livello di emissioni coerente con l'accordo di Parigi.

A sua volta, la Commissione europea ha quantificato i benefici previsti del nuovo regolamento sulle automobili e sui furgoni in questo modo: a) 170 milioni di tonnellate di CO₂ ridotte nel periodo 2020-2030 e migliore qualità dell'aria soprattutto nelle città; b) aumento del PIL fino a €6,8 miliardi nel 2030, creando fino a 70.000 posti di lavoro aggiuntivi; c) risparmi per i consumatori fino a €600 su una nuova auto acquistata nel 2025 e fino a €1500 per una nuova auto acquistata nel 2030; d) riduzione del consumo di petrolio di 380 milioni di tonnellate nel periodo dal 2020 al 2040, equivalente a circa €125 miliardi ai prezzi di oggi (circa €6 miliardi in media all'anno).

¹² 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 20 – Emissioni dirette di CO₂ dai trasporti sotto diversi scenari di emissioni. Risultati stimati dal ICCT Roadmap Model



Fonte: ICCT (2019)

4.3 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 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 21.

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 stata uno delle prime nazioni a introdurre una tassazione basata sulla CO₂ nel 2008);

Figura 21 – Contributo cumulativo da diversi determinanti della decarbonizzazione delle automobili in Finlandia dal 2002 al 2014

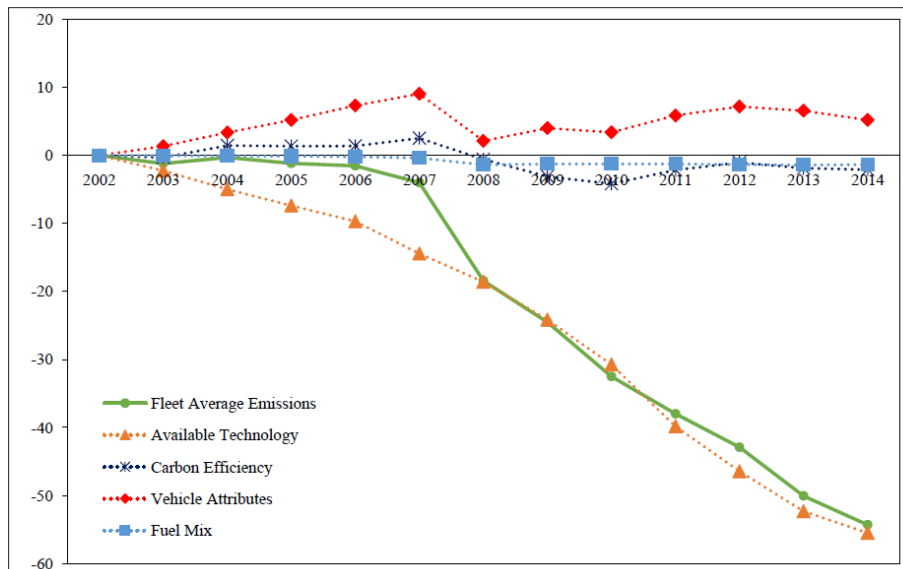


Figure 3. Cumulative Contributions of Different Pathways to the Decarbonization of the Finnish New Car Fleet (g/km); 2002–2014.

- 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 delle 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 ovviamente 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 22. 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.

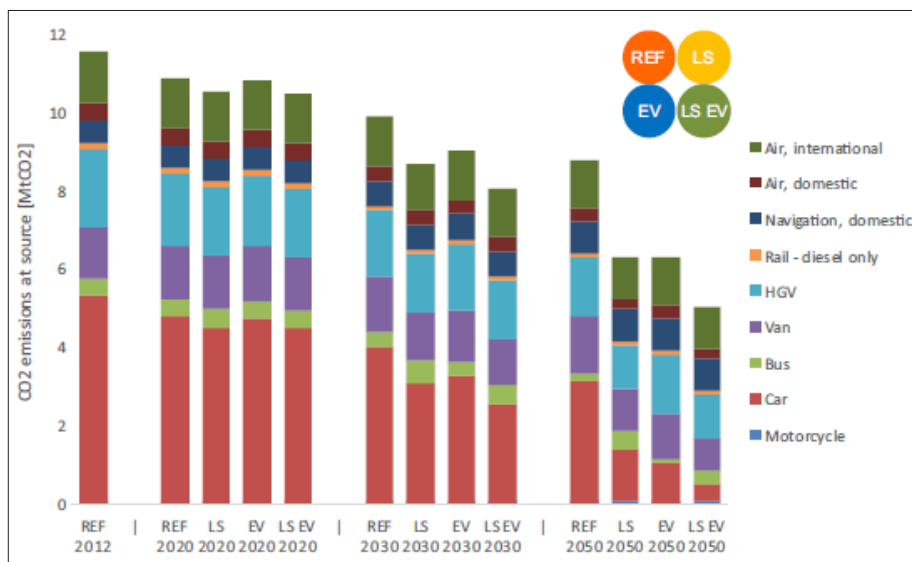
Il risultato principale è che lo scenario che prevede modifiche dello stile di vita (LS) genera riduzioni rispetto allo scenario di riferimento (REF) del 12% nelle emissioni di CO₂ nel 2030 e del 28% nel 2050 (Figura 23). Ciò è dovuto soprattutto alle riduzioni delle emissioni delle auto, compensate in parte dalle maggiori emissioni degli autobus, treni e moto dovute al cambiamento modalità. Lo scenario EV "tecono-centrico" 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.

Figura 22 – Scenari formulati da Brand *et al.* (2019)

Table 1 The four socio-technical scenarios for Scotland			
REF	Reference (REF)	LS	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	
EV	Electric vehicle promotion and petrol/diesel 'phase-out' (EV)	LS 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	

Figura 23 – Impatto degli scenari formulati da Brand *et al.* (2019)



5. 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 elettrici¹³ 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 litro. (<https://hypertextbook.com/facts/2003/ArthurGolnik.shtml>).

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;

¹³ 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.

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.

- 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 prudentiale 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 differenza

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

geografiche e c) anche sulla produzione e smaltimento delle batterie con tecnologie ancora in evoluzione.

Se dalla considerazioni 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).

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. Si confronti per una discussione sulle preferenze dei consumatori Danielis *et al.* (2018, 2019b), Gian-soldati *et al.* (2017, 2018) e Scorrano *et al.* (2019).

Tavola 11 – 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

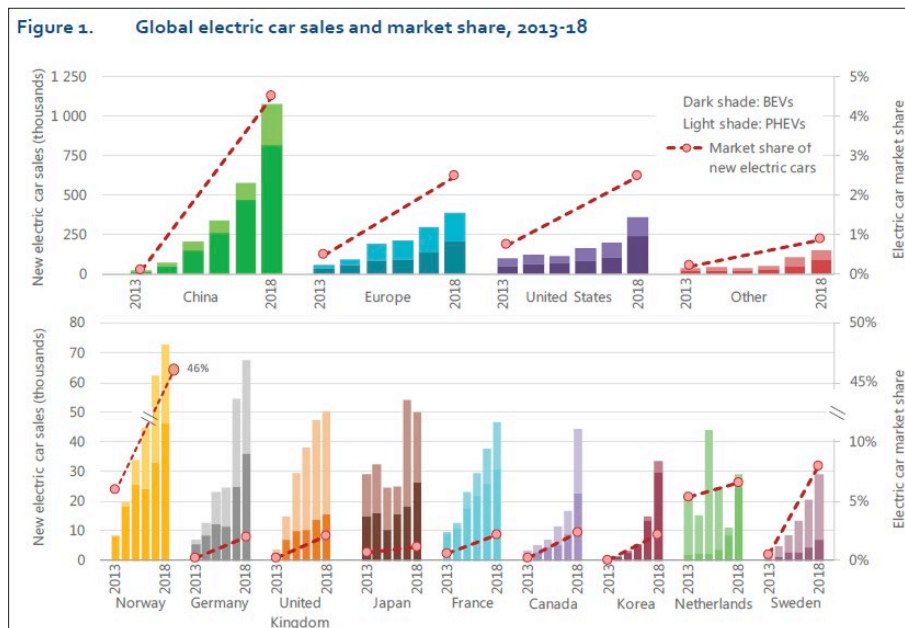
Source: Why Battery Electric Cars are Dominating Hydrogen Fuel Cell Cars, <https://www.youtube.com/watch?v=k7JRIUPhSJE>

5.1 Sistemi propulsivi: elettrico e idrogeno

I VEICOLI ELETTRICI

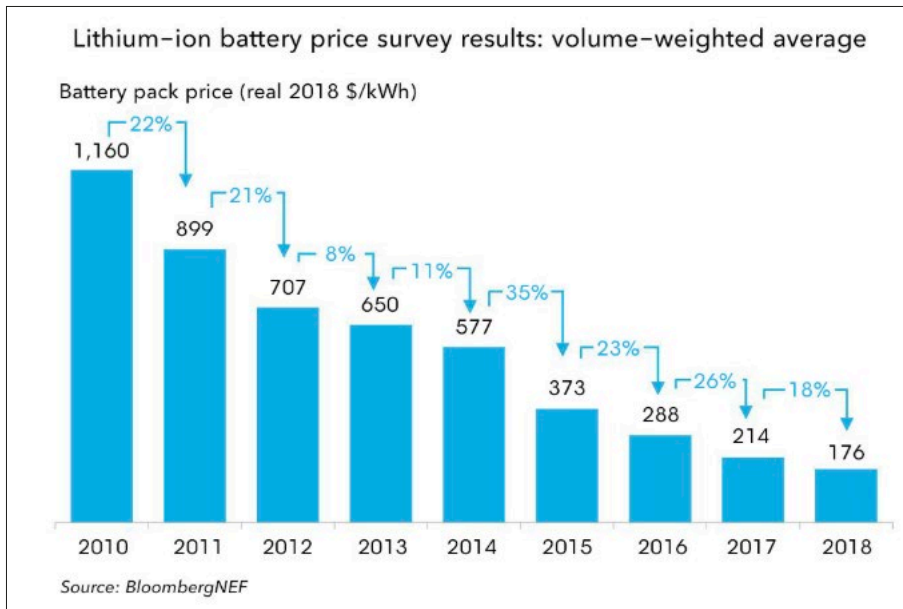
Il dato incoraggiante è che i veicoli elettrici cominciano ad essere venduti in quantità non insignificanti (Figura 24). In valori assoluti a livello mondiale nel 2018 sono state venduti 2 milioni di veicoli elettrici (puri + ibridi plug-in) e si stima saranno quasi 3 milioni nel 2019¹⁶, rispetto ai 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 dirigistica 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 vicine al 10%. Anche la Cina punta a toccare nel 2019 il 7%.

Figura 24 – Immatricolazioni e quote di mercato delle auto elettriche (tratto da IEA, 2019)



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

Figura 25 - L'andamento dei prezzi delle batterie al litio (il prezzo medio pesato sui volumi acquistati) (prezzi reali 2018 \$/kWh). Bloomberg (2019)



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) (Figura 25).

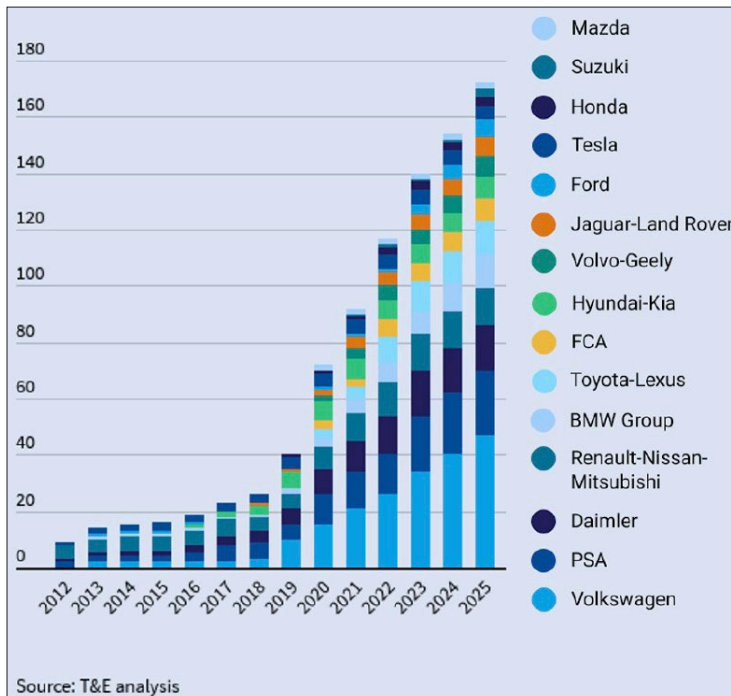
Per ora ciò non ha comportato una riduzione dei prezzi di acquisto degli EV relativamente a quelli a combustione interna. La differenza di prezzo è infatti ancora considerevole (attorno ai 10 mila euro), solo in parte compensata dai risparmi di costi operativi che si ottengono nell'arco della vita utile del veicolo (Scorrano *et al.*, 2019). Sicuramente, però gli EV attualmente disponibili 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 contribuito non poco la comparsa di fitte reti di colonnine di ricarica, sia costruite dalle case automobilistiche (es. Tesla, Ionity¹⁷) che dai

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".

Figura 26
Numero di
modelli elettrici
nel mercato
europeo

Fonte:
T&E (2019)

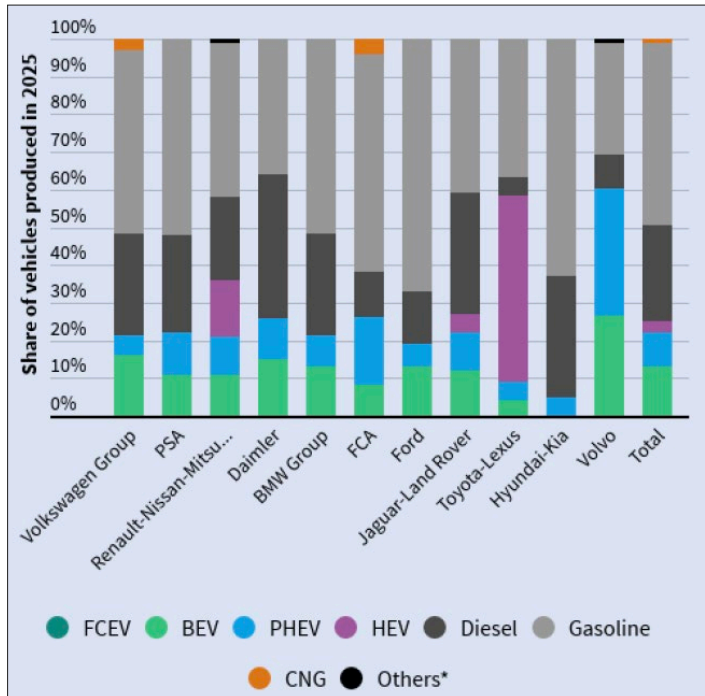


distributori di energia (es. Enel X, E.on) che da imprese private specializzate in questo settore (es. Fastned in Olanda). Inoltre, è decisamente aumentata la potenza installata in alcune stazioni di ricarica arrivando ad oggi a 350 KW, il che, congiuntamente alla capacità delle più recenti batterie di ricaricarsi rapidamente, 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. Da uno dei siti di monitoraggio degli EV (BEV+PHEV) nel mercato americano (insideevs.com), si desume la seguente progressione misurata al mese di gennaio di ciascun anno: 2012, 9; 2013, 16; 2014, 22; 2015, 24; 2016, 26; 2017, 32; 2018, 42; 2019, 45. 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. La Figura 26 mostra il numero di modelli puramente elettrici (BEV) che si prevede saranno offerti nei prossimi anni. 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.

Figura 27 – Piani di produzione in Europa per casa produttrice al 2025

Fonte: T&E (2019)



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 2025 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 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 28.

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. La International Energy Agency nel suo ultimo rapporto (IAE, 2019) formula due scenari: a) il New Policies Scenario, che tiene conto degli obiettivi e delle politiche formulate da ciascun governo e dalle aziende automobilistiche e b) lo scenario EV30@30 che tiene conto della partecipazione proattiva del settore privato, dei più promettenti progressi tecnologici e del supporto politico ai veicoli elettrici. Il termine EV30@30 deriva dalla omonima campagna informativa il cui obiettivo è raggiungere una quota di mercato del 30% entro il 2030 per veicoli elettrici in tutte le modalità tranne le due ruote (dove le quote sono già più alte).

Nel New Policies Scenario, nel 2030 si stima che le vendite globali di veicoli elettrici raggiungano i 23 milioni annuali e che lo stock di veicoli superiori i 130 milioni di veicoli. Nello scenario EV30@30, si stima invece che le vendite di veicoli elettrici

Figura 28 – Le politiche dirette a sostegno dei veicoli elettrici

		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)		✓	✓	✓	✓	✓	✓*

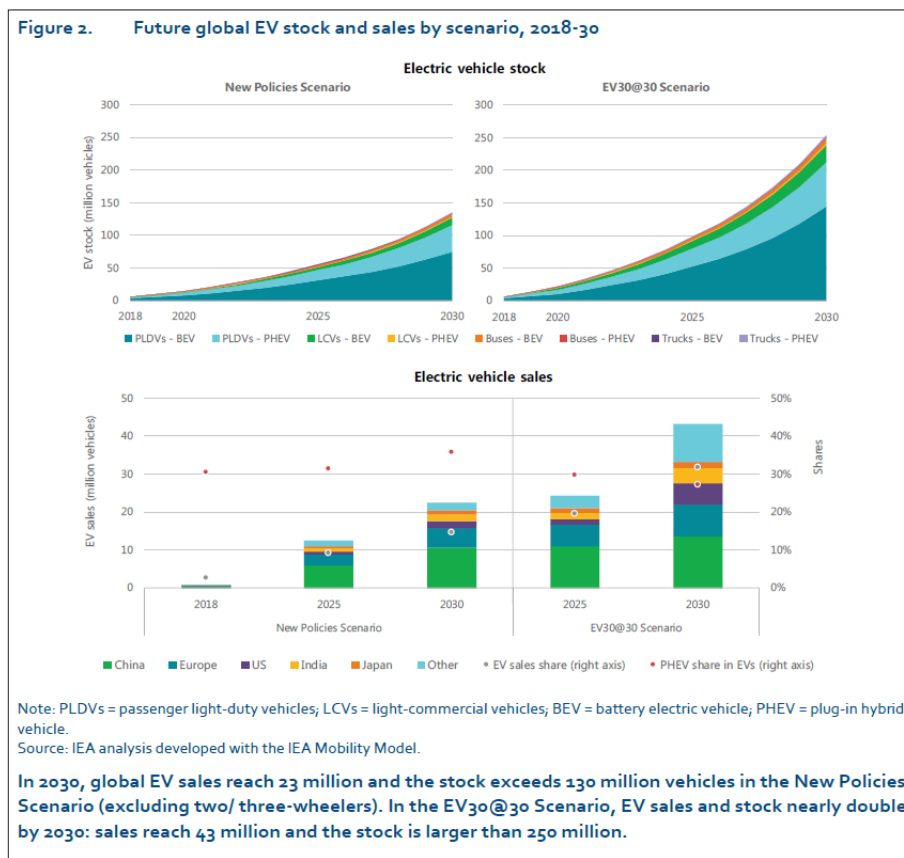
* Indicates that the policy is only implemented at a state/province/local level.
 ** Standards for chargers are a fundamental prerequisite for the development of EV supply equipment. All regions listed here have developed standards for chargers. Some (China, European Union, India) are mandating specific 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.

Fonte: IAE, 2019

raggiungano i 43 milioni annuali e lo stock più di 250 milioni. Nel primo caso, la domanda di prodotti petroliferi si ridurrebbe di 127 milioni di tonnellate di petrolio equivalente (circa 2,5 milioni di barili al giorno) mentre, nel secondo caso, la riduzione della domanda di petrolio raggiungerebbe i 4,3 milioni di barili al giorno.

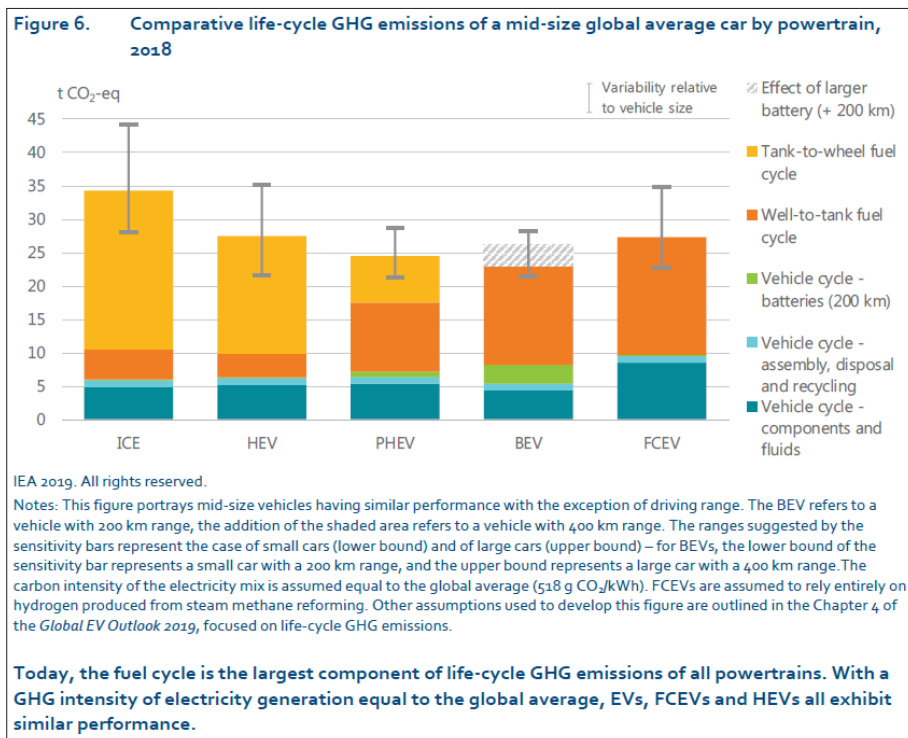
Il dibattito se un'auto elettrica emetta più o meno CO₂ dell'auto a combustione interna, considerando l'intero ciclo di vita, è ampio e vivace, sia nella letteratura scientifica (European Environment Agency, 2016; Cavallaro *et al.*, 2018; Danielis 2019a; Danielis 2019c) che nei media. È emerso che non 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 prodotto prevalentemente da rinnovabili o da nucleare, le emissioni complessive delle auto elettrico sono di molto inferiori a quelle delle auto tradi-

Figura 29 – Previsioni di penetrazione dei veicoli elettrici secondo IEA (2019)



zionali. 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

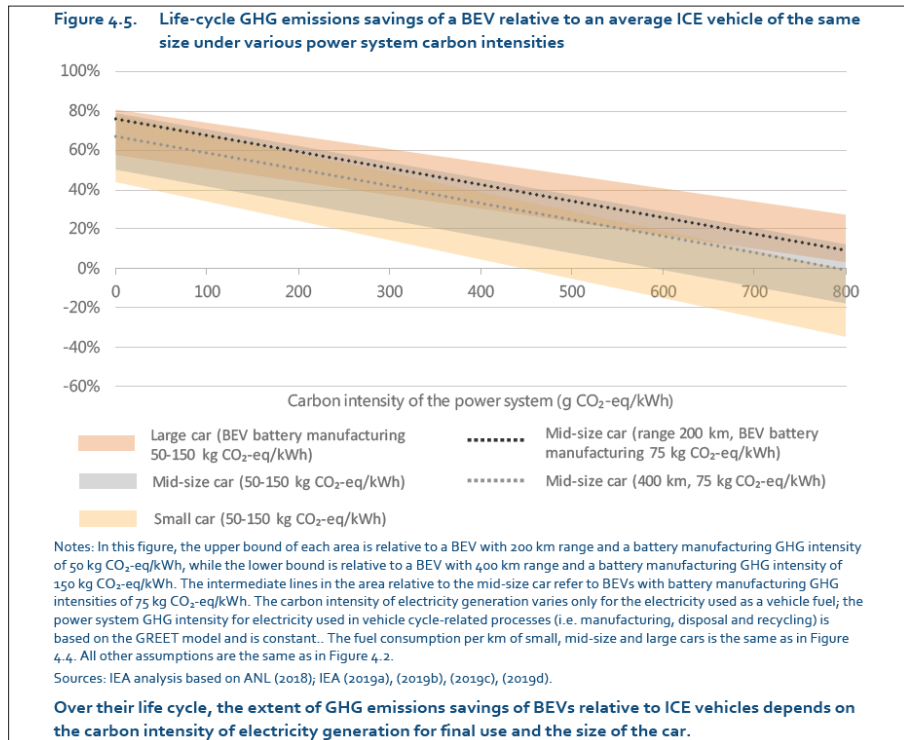
Figura 30 – Emissioni media dai veicoli con diversi sistemi di propulsione secondo IEA (2019)



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) (Figura 30). 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% (Figura 31). 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%

Figura 31 – Risparmio di emissioni di CO₂eq di veicoli elettrici rispetto agli ICE in relazione al mix elettrico secondo IEA (2019)

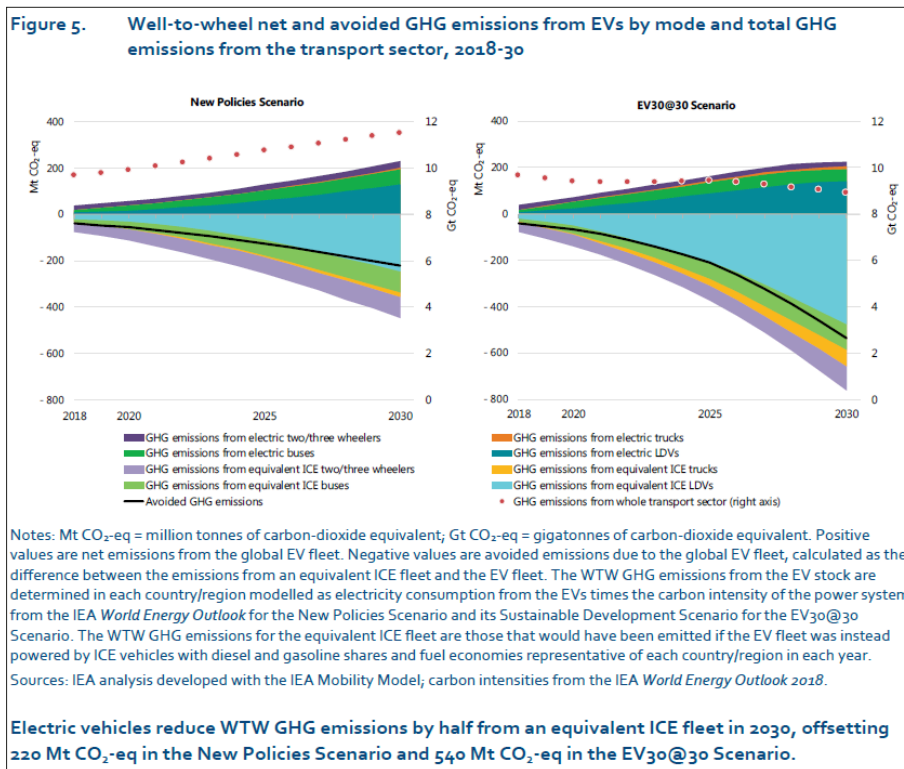


ed il 60%, a seconda del tipo di auto elettrica considerato. Nei paesi in cui il mix di generazione di energia è dominato dal carbone, sono invece i veicoli ibridi a presentare emissioni inferiori rispetto ai veicoli elettrici.

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 (Figura 32).

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).

Figura 32 – Emissioni di CO2 evitate



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 a 1¹⁸. Pur essendo energeticamente inefficiente, l'idrogeno potrebbe però essere utilmente sfruttato per l'accumulo di energia (Parra *et al.*, 2019).

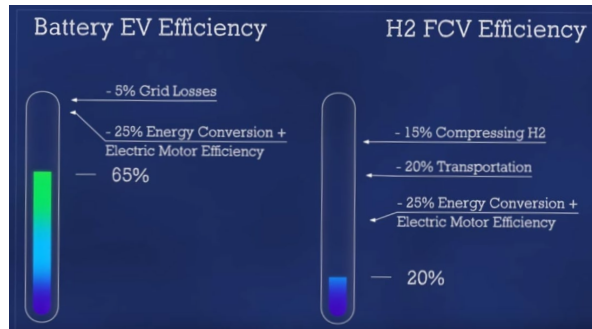
Uno svantaggio considerevole dell'idrogeno rispetto all'elettricità è che, mentre quest'ultima può utilizzare (con miglioramenti non eccessivamente onerosi) le linee elettriche esistenti (in molti paesi), non esiste invece una infrastruttura di ricarica dei veicoli ad idrogeno. Pertanto questa deve essere 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.

La Figura 33 illustra in modo comparativo il bilancio energetico delle due tecnologie. Le batterie dei veicoli 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

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>)

Figura 33 – Confronto tra l'efficienza dei veicoli elettrici e quelli a idrogeno

Fonte:
<https://www.youtube.com/watch?v=f7MzFfuNOtY>.



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 è ad oggi 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 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 del-

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.

le 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 governo scozzese, il progetto ha esplorato la fattibilità pratica ed economica di

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 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."

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 (4.000 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.

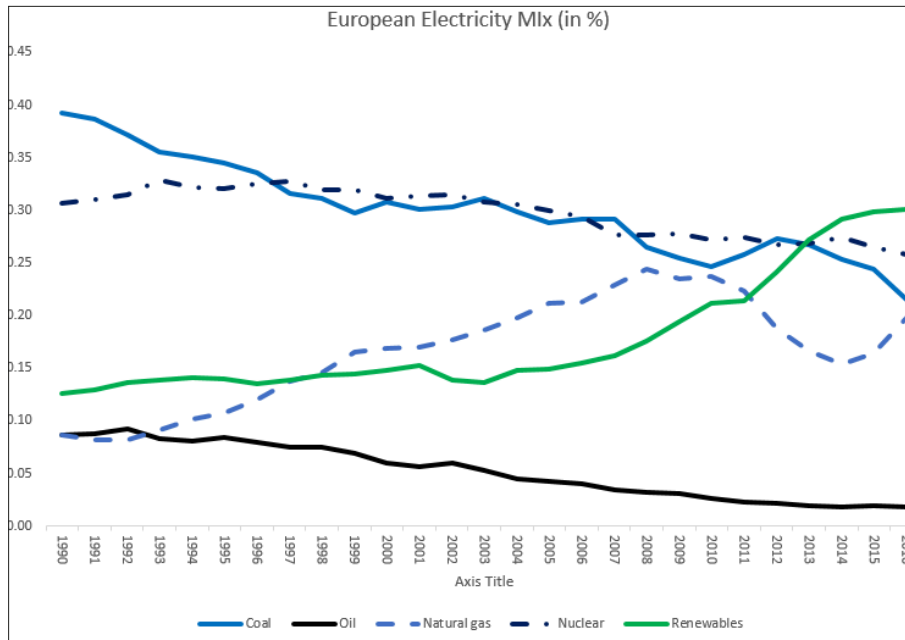
5.2 *La produzione sostenibile di energia elettrica*

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 (Figura 34). 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 leggermente dal 30% al 25%. Un andamento simile nello stesso periodo si è avuto in Italia (Tavola 12), 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.

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

Figura 34 – Composizione percentuale del mix elettrico in Europa 1990-2016



Fonte: <https://www.eea.europa.eu/>

Tavola 12 – Andamento del mix elettrico in Italia 1990-2016

Anno	Totale	Carbone	Petrolio	Gas Naturale	Nuclea-re	Rinno-vabili	Idro-elettrico	Eolico	Bio-masse	Solare	Geo-termia
1990	216.6	32.0	102.7	43.4	0.0	38.4	35.1	0.0	0.1	0.0	3.2
1990	100%	15%	47%	20%	0%	18%	16%	0%	0%	0%	1%
2016	289.8	35.6	12.1	128.9	0.0	109.8	44.3	17.7	19.5	22.1	6.3
2016	100%	12%	4%	44%	0%	38%	15%	6%	7%	8%	2%

Fonte: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_generation_statistics_%E2%80%93_first_results#Production_of_electricity

Nel periodo 2016-18, tale trend si è rafforzato (Tavola 13). Le fonti convenzionali (petrolio, carbone e gas naturale) sono scese dal 48,8% al 45,9%. Le rinnovabili si attestano al 28,2% con l'eolico che supera l'idroelettrico.

Tavola 13 – Composizione percentuale del mix elettrico in Europa 2016-2018

	2016	2017	2018
Termico convenzionale	48,8	49,0	45,9
Nucleare	25,6	25,0	25,5
Idroelettrico	12,1	10,4	11,8
Eolico	9,7	11,4	12,2
Solare	3,6	3,8	4,0
Geotermico	0,2	0,2	0,2
Altro	0,1	0,1	0,2

Fonte: <https://www.eea.europa.eu/>

La Tavola 14 ci fornisce un'analisi a livello di paese. Si può notare come i mix elettrici nazionali siano 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.

Tavola 14 – Composizione percentuale del mix elettrico nei paesi europei nel 2016 (valori percentuali)

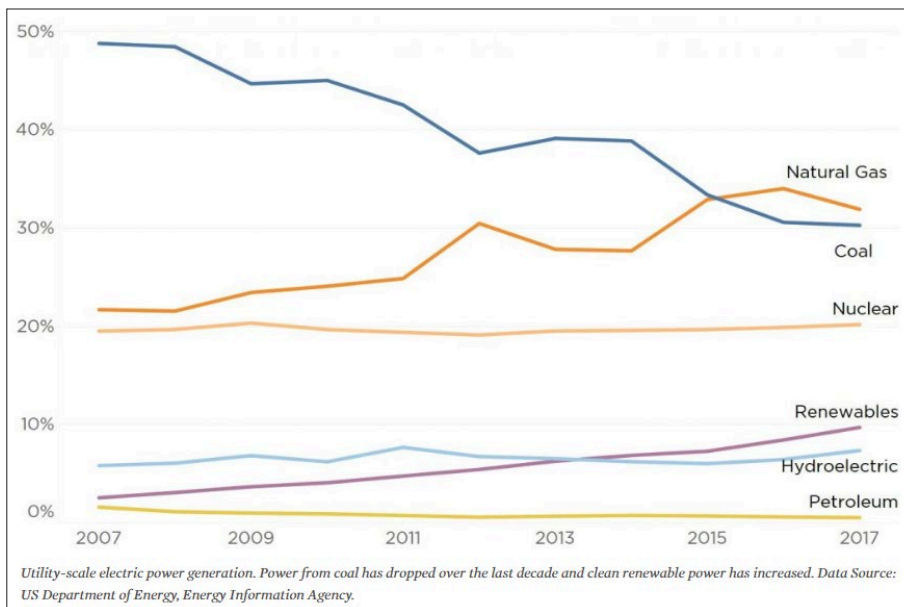
	TERMICO TRADIZIONALE	NUCLEARE	IDRO-ELETTRICO	EOLICO	SOLARE	GEOTERMICO E ALTRO
EU-28	45,9	25,5	11,8	12,2	4,0	0,4
EA-19	43,6	27,0	11,9	12,2	4,7	0,6
EE	93,9	0,0	0,2	6,0	0,0	0,0
CY	91,4	0,0	0,0	4,6	4,0	0,0
MT	90,9	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1
PL	90,2	0,0	1,5	8,1	0,2	0,0

NL	83,9	2,9	0,1	10,9	2,2	0,0
EL	68,6	0,0	11,4	12,4	7,5	0,0
IE	68,3	0,0	3,2	28,6	0,0	0,0
IT	66,0	0,0	17,6	6,2	8,2	2,0
LV	61,0	0,0	37,2	1,8	0,0	0,0
CZ	58,6	34,5	3,2	0,7	2,8	0,1
UK	57,0	18,6	2,4	17,9	4,1	0,0
DE	56,0	12,6	3,5	19,6	8,1	0,1
PT	53,2	0,0	23,2	21,6	1,7	0,4
DK	48,6	0,0	0,1	48,0	3,3	0,0
BG	46,4	36,7	11,2	3,2	2,5	0,1
HU	45,3	49,9	0,7	2,0	2,0	0,0
BE	43,5	39,0	1,8	10,4	5,0	0,3
ES	42,2	20,4	13,8	19,0	4,6	0,0
FI	39,2	32,5	19,5	8,7	0,1	0,0
RO	38,5	17,8	30,1	10,7	3,0	0,0
HR	31,3	0,0	57,9	10,2	0,5	0,0
SI	30,8	35,9	31,6	0,0	1,7	0,0
LT	25,2	0,0	29,6	35,7	2,5	7,0
AT	24,9	0,0	56,7	8,9	0,0	9,4
SK	22,9	58,2	16,2	0,0	2,5	0,2
LU	21,4	0,0	61,3	12,2	5,2	0,0
FR	9,8	71,3	12,5	4,7	1,7	0,0
SE	9,4	41,6	38,5	10,5	0,0	0,0
NO	2,4	0,0	95,0	2,6	0,0	0,0

Fonte: <https://www.eea.europa.eu/>

Una dinamica molto simile si è avuta negli Stati Uniti (Figura 35) 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.

Figura 35 – Composizione percentuale del mix elettrico negli Stati 2007-2016



<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>

A livello mondiale (Tavola 15), le tendenze sono invece leggermente diverse: il carbone continua a mantenere una quota importante; sono diminuiti il petrolio 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 Pa-

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

Tavola 15 – Composizione percentuale del mix elettrico a livello mondiale 1990-2016
World Source: IEA Electricity Information 2018 – (valori percentuali)

ANNO	CARBONE	PETROLIO	GAS	BIOFUEL	RIFIUTI	NUCLEARE	IDRO	GEO-TERMIA	SOLARE PV	SOLARE TERMICO	VENTO
1990	37	11	15	1	0	17	18	0	0	0	0
1995	38	9	15	1	0	18	19	0	0	0	0
2000	39	8	18	1	0	17	17	0	0	0	0
2005	40	6	20	1	0	15	16	0	0	0	1
2010	40	5	22	1	0	13	16	0	0	0	2
2015	39	4	23	2	0	11	16	0	1	0	3
2016	38	4	23	2	0	10	17	0	1	0	4

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

rigi, 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.

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

Sulla base della discussione precedente possiamo concludere che:

- a) Data la complessità dei sistemi di trasporto, la sfida si gioca su molti mercati e su molte tipologie di veicoli.
- b) Le difficoltà sono di due ordini: tecnologiche ed economico-politico-sociali.
- c) Le politiche classificate come *avoid* e *shift*, seppur importanti, non hanno in passato sortito effetti rilevanti e non si vede come possano farlo in futuro. Le principali speranze sono riposte nelle strategie di *improve*. In ogni caso, serve un mix di politiche che stimolino sia la domanda che l'offerta verso investimenti e veicoli con un elevato potenziale di decarbonizzazione.
- d) La sostituzione dei veicoli a combustione interna con i veicoli elettrici o a idrogeno ha senso solo se parallelamente l'energia elettrica verrà prodotta con fonti rinnovabili a zero emissioni di carbonio.
- e) Ottenere riduzioni delle emissioni di CO₂, o addirittura decarbonizzare i trasporti, per raggiungere gli obiettivi di contenimento della temperatura a 1,5° o 2° al 2050, dati gli attuali trend, non sembra al momento possibile.

Sul punto a) relativo alla "complessità dei sistemi di trasporto", abbiamo distinto tra la mobilità delle persone e la mobilità delle merci e per lunghezza degli spostamenti. 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 abbiamo visto che gli sforzi fatti finora 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.

Sul punto b) attinente "le difficoltà tecnologiche ed economico-politico-sociali", 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 na-

tura 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.

Sul punto c) riguardante "le politiche *avoid, shift, improve*", 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 che 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.

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.

Questa considerazione ci porta quindi al punto d) attinente "l'energia elettrica prodotta con fonti rinnovabili". 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 na-

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.

turale 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.

Venendo al conclusivo punto e) relativo alla reale possibilità 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, dati gli attuali trend, tale possibilità sembra al momento scarsamente probabile. 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 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.

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."

- ACEA – European Automobile Manufacturers Association (2018a). Report available at: https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2018.pdf
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., Hemous, D., 2012. The environment and directed technical change. *Am. Econ. Rev.* 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 Clim. 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.
- Chiaromonti, 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. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0121-1>
- 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*, Vol. 119, August, pp. 268-281, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.024>
- 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 N. 2, http://www.sietitalia.org/wpsiet/WP%20SIET%202019_2%20-%20Danielis.pdf
- Danielis R., Giansoldati M., Scorrano M. (2019a), Consumer- and Society-Oriented Cost of Ownership of Electric and Conventional Cars in Italy, Working Paper SIET, N. 3, <http://www.sietitalia.org/>

- wpsiet/WP%20SIET%202019_3%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, N. 1, http://www.sietitalia.org/wpsiet/WP%20SIET%202019_1%20-%20Danielis.pdf
- 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 No 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*, Vol. 165, Part A, December, pp. 267-274, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.095>
- 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*, N. 2, article 5, https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/22580/1/REPoT_2017%282%29-5_Giansoldati_Rotaris_Danielis_Scorrano.pdf
- Gota, S., Huizenga, C., Peet, K., Medimorec, N. (2017). E-mobility overview. http://slocat.net/sites/default/files/e-mobility_overview.pdf. Accessed 21 October 2017.
- 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, Sudhir, Cornie Huizenga, and Karl Peet. "Implications of 2DS and 1.5 DS for land transport carbon emissions in 2050", *Partnersh. Sustain. Low-Carbon Transp.(SLoCaT)*, PPMC(2016).
- Goulder, L. H., Parry, I. W. (2008). Instrument choice in environmental policy. *Review of environmental economics and policy*, 2(2), 152-174.
- Halim, R., Kirstein, L., Merk, O., Martinez, L. (2018). Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment. *Sustainability*, 10(7), 2243.
- 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](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-LCV-CO2-2030_ICCTupdate_201901.pdf)
- IEA (2016d). *Global EV Outlook 2016*. Paris: IEA Publications.
- IEA (2017c). *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, <https://doi.org/10.1787/9789282108000-en>
- Le Quéré *et al.* (2018). Global Carbon Project; Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC), [http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO₂-emissions](http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions).
- 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? *Rev. Environ. Econ. Policy* 10 (1), 129–148.
- Massimiliano Lepratti, Roberto Romano, Gianni Silvestrini, Martina Valetto (2017) *Programmare un'economia a crescita 1,5°. Il carbon pricing in Europa e in Italia*, ISBN 978-88-94200-31-7.
- 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., Krieglner, 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*, N. 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* (in pubblicazione).
- 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* (pp. 599–670). New York: Cambridge University Press.
- SLoCaT – Partnership on Sustainable Low-carbon Transport (2016) *Implications of 2DS and 1.5DS for Land*.
- 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*, June, 2019. European Federation for Transport and Environment AISBL.
- Transport Carbon Emissions in 2050. November 2016. <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 BJ, De Cian E, Wing IS (2019) "Amplification of Future Energy Demand Growth due to Climate Change." *Nature Communications* doi: 10.1038/s41467-019-10399-3
- 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, May). What Drives Decarbonization Of New Passenger Cars?. In *Local Energy, Global Markets, 42nd IAEE International Conference*, May 29-June 1, 2019. International Association for Energy Economics.

Cambiamenti climatici e trasporto aereo: dimensioni del problema e soluzioni proposte

LUCIA ROTARIS

1. INTRODUZIONE

Si stima che il riscaldamento del pianeta sia aumentato di un grado dal 1800 e che potrà superare la soglia limite di +1,5 gradi entro il 2030 se non verranno approntati efficaci interventi di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e di cattura e stoccaggio dei gas presenti in atmosfera. I settori maggiormente responsabili per la produzione di CO₂ sono la produzione di energia ed il riscaldamento degli edifici (25%), la riduzione delle aree boschive (18%), l'agricoltura e l'allevamento (13%) ed il trasporto (13%). Nonostante il contributo del trasporto aereo sia ancora modesto, in particolare rispetto al trasporto stradale, i tassi di crescita delle emissioni prodotte dalla modalità aerea sono in costante aumento e le previsioni sulla loro futura evoluzione sono allarmanti. Si prevede, infatti, che il consumo di carburanti del settore aereo nel 2040 sarà il quadruplo dei valori registrati nel 2010.

Le ragioni di una crescita così marcata sono molte: l'aumento del reddito pro capite, l'intensificazione della globalizzazione, lo sviluppo dei mercati emergenti e l'evoluzione delle scelte di consumo dei loro abitanti, le offerte commerciali particolarmente convenienti delle compagnie aeree "low cost", solo per citarne alcune.

Vero è anche che l'opinione pubblica inizia a percepire la gravità del problema, come testimoniato non solo dalla maggiore copertura che i media riservano alle notizie relative ai fenomeni meteorologici estremi causati dal cambiamento climatico, ma anche dalla nascita di movimenti votati al boicottaggio del trasporto aereo ed alla promozione di scelte di consumo più responsabili ed ambientalmente sostenibili¹.

La teoria economica individua nei costi sociali del trasporto, definiti esternalità negative, l'origine del problema. Si tratta dei costi causati da chi produce e/o consuma il servizio, ma non si fa carico dei costi ambientali ad esso associati. Il prezzo pagato da chi acquista il servizio di trasporto, infatti, non include il costo dell'impatto ambientale prodotto. Il segnale di prezzo è, quindi, distorto e porta ad una quantità di servizi venduti sul mercato superiore a quella che si verificerebbe se anche i costi ambientali fossero inclusi nel prezzo del biglietto aereo. Il cambiamento climatico si distingue, per altro, dalle altre forme di esternalità negativa (inquinamento atmosferico, inquinamento acustico, incidenti, ...) perché non produce i suoi effetti a livello locale, in prossimità del luogo in cui le emissioni di gas ad effetto serra vengono prodotte, ma a livello globale, richiedendo per tale ragione interventi più complessi perché, per essere efficaci, devono essere condivisi a livello internazionale.

L'obiettivo del presente lavoro è illustrare l'andamento del settore del trasporto aereo e delle emissioni di gas ad effetto serra da esso prodotte (Sezione 2), descrivere gli strumenti a disposizione del decisore pubblico per gestire il problema (Sezione 3) e riassumere le strategie adottate per ridurre le emissioni generate dal settore (Sezione 4).

2. IL TRASPORTO AEREO: TENDENZE DEL MERCATO ED EMISSIONI DI GAS AD EFFETTO SERRA

Nonostante la temporanea volatilità della domanda registrata in occasione della crisi economico finanziaria del 2008, il trasporto aereo è in rapida e pressoché costante espansione ed i tassi di crescita sono impressionanti (Figura 1). Nel 2016, il traffico globale è aumentato del 6,3% rispetto al 2015, con un numero di passeggeri annuali che supera i 3,7 miliardi. In UE, nel 2017, hanno viaggiato in aereo 1043 milioni di persone, con un aumento del 7,3% rispetto al 2016. Il principale aeroporto di Londra, Heathrow, ha registrato il maggior numero di passeggeri aerei (78 milioni), seguito dall'aeroporto di Parigi Charles de Gaulle (69 milioni).

¹ <https://noflyclimatesci.org>

Figura 1 – Previsioni di crescita del numero di viaggi effettuati utilizzando la modalità aerea in milioni (www.iata.org/pax-forecast)

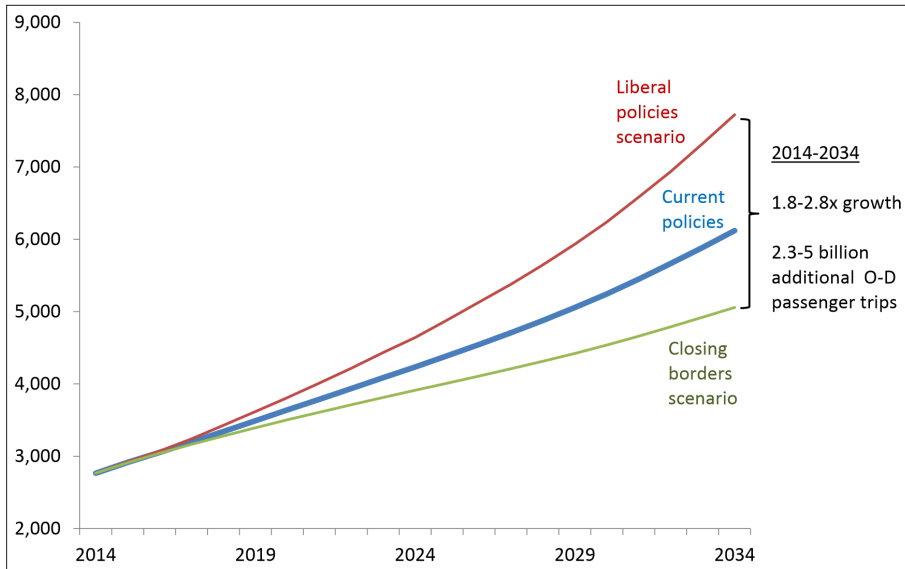
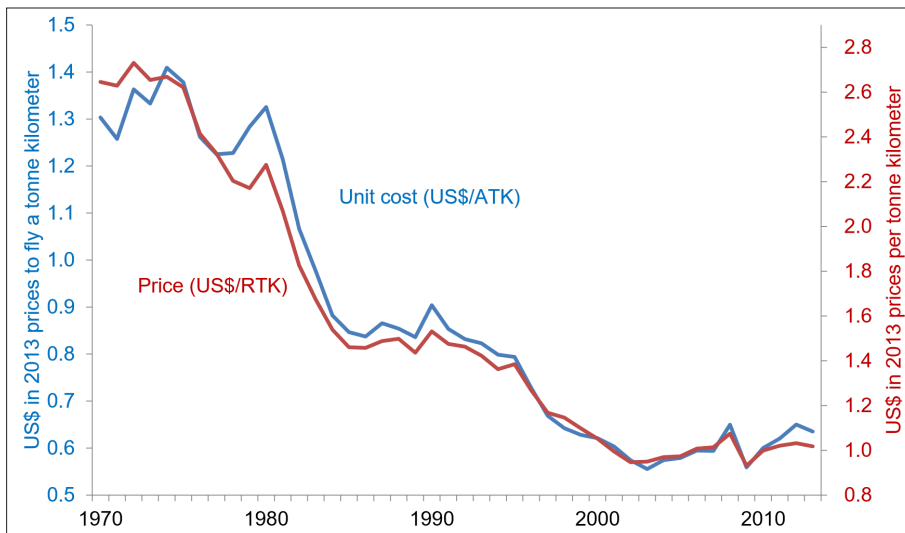


Figura 2 – Andamento del prezzo del trasporto aereo nel tempo (www.iata.org/pax-forecast)



Nel lungo termine il fenomeno non dovrebbe esaurirsi, si prevede, infatti, che i chilometri passeggeri annuali di qui al 2035 aumenteranno ad un tasso medio compreso fra il 4,5% ed il 4,8%. Saranno i mercati asiatici, mediorientali, latinoamericani ed africani a registrare i tassi di crescita più alti. Nei mercati più maturi, invece, si prevedono valori leggermente più contenuti: fra il 2,9% ed il 3,1% per il Nord America ed attorno al 3,7% per l'Europa (European Commission, 2017).

Secondo le analisi condotte dall'International Air Transport Association (IATA, www.iata.org/pax-forecast) il fattore determinante della crescita della domanda di trasporto aereo è ascrivibile al miglioramento degli standard di vita nei paesi emergenti ed al relativo aumento del reddito pro-capite. Secondo l'IATA, infatti, la frequenza annuale di utilizzo della modalità aerea passerebbe da 0,04 viaggi all'anno per persona per livelli di reddito bassi, a 0,27 per livelli di reddito medi (entro i \$20.000) a 1,80 per livelli di reddito alti (oltre i \$20.000).

Il secondo fattore di crescita più rilevante è la riduzione del costo dei biglietti aerei che, come illustrato in Figura 2, sono più che dimezzati dagli anni '70 ad oggi.

È soprattutto il turismo a trainare la domanda di trasporto aereo, come attestato dalle stime della United Nations World Tourism Organization (UNWTO) secondo cui nel 2017 il 57% del turismo internazionale ha utilizzato la modalità aerea (http://people.unica.it/carlamassidda/files/2017/06/UNWTO_Tourism-Highlights_2017.pdf).

Il settore aeronautico è cambiato anche grazie ai notevoli progressi tecnologici che, con lo sviluppo di aeromobili bimotore più efficienti come gli Airbus A350 ed i Boeing B787, hanno permesso il moltiplicarsi dei voli point-to-point e l'ampliamento delle connessioni offerte agli utenti.

Sono emersi, inoltre, nuovi modelli di business "low cost" (ad esempio Ryanair e EasyJet) basati sull'uso di scali secondari che hanno rivoluzionato la geografia degli scali espandendo l'area del mercato servito. Le compagnie che utilizzano questo modello organizzativo hanno ormai conquistato il 20% del mercato mondiale. Il successo delle compagnie "low cost" è comunque ascrivibile anche ai consistenti sussidi offerti dagli amministratori delle località turistiche minori che hanno visto nel trasporto aereo l'opportunità di un rapido sviluppo.

Nel 2015 i profitti ottenuti dalle compagnie aeree a livello globale hanno raggiunto valori record, con margini operativi nell'ordine dell'8,8% e ben 18 compagnie aeree che hanno registrato profitti operativi superiori al miliardo di dollari. I vettori che hanno registrato le performance migliori sono quelli statunitensi che, anche grazie ad operazioni di consolidamento, hanno portato le tre principali compagnie americane (American Airlines, Delta Air Lines e United) ad ottenere i valori maggiori in termini di ricavi, margine operativo e numero di passeggeri. Anche in Europa i margini operativi delle compagnie aeree sono aumentati, per quanto in maniera meno marcata rispetto al contesto statunitense,

principalmente a causa della bassa crescita economica del continente che non ha stimolato in modo altrettanto vivace la domanda. Le tre principali compagnie aeree europee per redditività sono state la Lufthansa, Ryanair e IAG.

La crescita esponenziale del trasporto aereo è stata accompagnata da un notevole aumento delle emissioni di gas inquinanti e dell'impatto ambientale da essi generati. I principali inquinanti emessi dai motori degli aerei sono l'anidride carbonica, gli ossidi di azoto, gli ossidi di zolfo, gli idrocarburi incombusti, il monossido di carbonio ed il particolato (PM)². Le stime dei valori delle emissioni prodotte e dei rispettivi trend di crescita variano a seconda del contesto geografico considerato, dell'orizzonte temporale studiato e dell'ente di ricerca che ha effettuato le stime.

Secondo le stime pubblicate dall'Air Transport Action Group (associazione non a scopo di lucro che comprende 50 membri fa cui i principali produttori di velivoli – Boeing, Airbus, Bombardier -, nonché le più importanti associazioni di compagnie aeree e di aeroporti), nel 2018 il settore del trasporto aereo ha prodotto 895 milioni di tonnellate di CO₂ su un totale di emissioni generate da attività antropiche pari a 42 miliardi³. Nel 2016, il trasporto aereo ha prodotto il 3,6% delle emissioni totali di gas a effetto serra nell'Unione Europea a 28 paesi ed il 13,4% delle emissioni dell'intero settore dei trasporti, essendo la seconda fonte di emissioni più importante dopo il trasporto stradale⁴. Nel 2015 le emissioni del trasporto aereo prodotte in Europa erano pari al 20% delle emissioni prodotte dal trasporto aereo a livello globale. Nel 2018 Ryanair è risultata fra i primi 10 produttori di emissioni in Europa, in 4 paesi europei le compagnie aeree sono state il maggior produttore di emissioni di CO₂ ed in altri 12 paesi europei compaiono fra i primi 10 produttori⁵.

L'aspetto più preoccupante è che mentre le emissioni generate da settori produttivi diversi dal trasporto stanno diminuendo, quelle prodotte dal trasporto aereo stanno crescendo e lo stanno facendo a tassi molto elevati. Considerando, ad esempio, tutti i voli in partenza dagli aeroporti dell'Unione Europea a 28 paesi, tra il 1990 e il 2016 le emissioni di CO₂ sono aumentate da 88 a 171 milioni di tonnellate (+ 95%)⁶. L'incremento delle emissioni di CO₂ nel 2017 rispetto al

² Il cambiamento climatico causato dai gas ad effetto serra non è l'unica esternalità negativa generata dal trasporto aereo, ad esso si aggiungono l'inquinamento atmosferico e l'inquinamento acustico, che però non tratteremo nel presente lavoro.

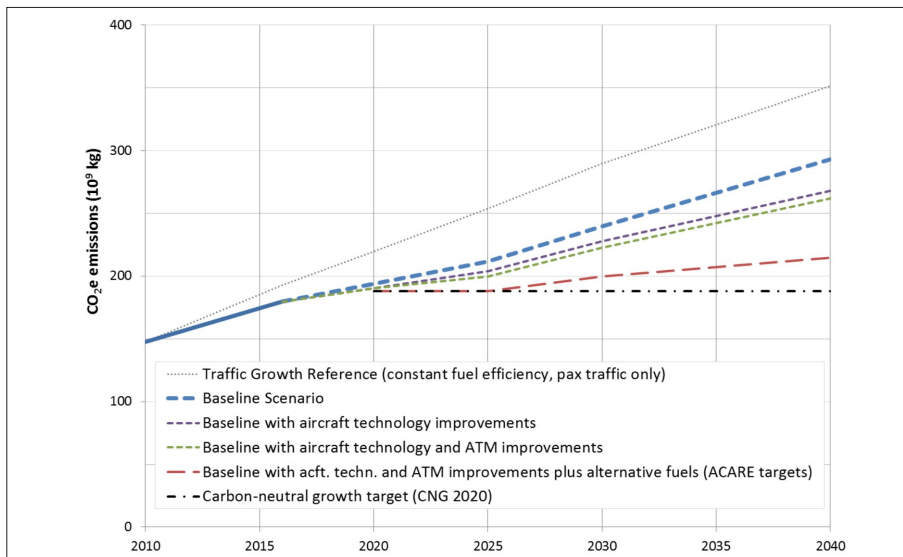
³ <https://www.atag.org/facts-figures.html>

⁴ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>

⁵ www.transportenvironment.org/news/airlines-are-biggest-carbon-emitters-four-european-countries

⁶ https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/eaer-2019_0.pdf

Figura 3 – Emissioni di CO₂ da trasporto aereo (solo passeggeri): trend ed analisi di scenario



<https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018-Dic/Action%20Plan%202018.pdf>

2005 è stato stimato nell'ordine del 16% ed addirittura del 10% rispetto al recente 2014. Nello stesso periodo, comunque, il consumo medio di carburante per chilometro passeggeri è diminuito del 24%, con un tasso di riduzione medio annuo del 2,8% tra il 2014 e il 2017. Nonostante l'efficienza della tecnologia avionica sia notevolmente aumentata, le emissioni hanno continuato a crescere principalmente a causa dell'aumento del numero di voli, delle dimensioni degli aerei e delle distanze percorse.

EUROCONTROL, organizzazione pan-europea che include operatori aerei civili e militari dedicata al sostegno dell'aviazione europea, ed EASA (European Union Aviation Safety Agency), l'agenzia europea per la sicurezza del trasporto aereo⁷, hanno stimato il traffico, il consumo di carburante e la produzione di emissioni di CO₂ del trasporto aereo originato dagli aeroporti facenti parte dell'ECAC (European Civil Aviation Conference), la più grande organizzazione aeronautica civile europea che comprende 44 paesi membri⁸. Come illustrato in Figura 3, ipotizzando che la tecnologia utilizzata non vari rispetto a quella impie-

⁷ <https://www.easa.europa.eu>

⁸ <https://www.ecac-ceac.org/>

gata nell'anno base, il 2010, e che non si intervenga con politiche di tassazione o regolamentazione del settore, le emissioni prodotte nel 2040 sarebbero più del doppio rispetto a quelle prodotte nel 2010.

Le analisi di scenario effettuate da EUROCONTROL ed EASA prevedono incrementi nettamente inferiori rispetto allo scenario base (linea tratteggiata grigia in Figura 3) che tiene conto dei miglioramenti tecnologici intervenuti fino al 2017, se si ipotizzano significativi miglioramenti della tecnologia avionica (linea tratteggiata viola in Figura 3), ottimizzazione della gestione del traffico aereo (ATM, Air Traffic Management, linea tratteggiata verde in Figura 3) e l'utilizzo di biocarburanti (linea tratteggiata rossa in Figura 3). L'ultimo scenario (linea tratteggiata nera in Figura 3) è quello auspicato dall'ICAO, l'International Civil Aviation Organization, che prevede la neutralizzazione totale degli incrementi di emissioni rispetto ai valori registrati nel 2020⁹.

3. I COSTI SOCIALI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO E LE SOLUZIONI PROPOSTE DALLA TEORIA ECONOMICA

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha recentemente stimato che le emissioni di CO₂ e degli altri gas ad effetto serra di origine antropica abbiano causato un aumento del riscaldamento globale di 1 °C rispetto ai livelli preindustriali e che il riscaldamento globale aumenterà di 1,5 °C tra il 2030 e il 2052 se le emissioni continueranno ad aumentare al ritmo attuale. Come conseguenza all'aumento delle temperature, sia terrestri sia oceaniche, si registrano: ondate di calore più frequenti nella maggior parte delle regioni terrestri, un aumento della frequenza e della durata delle onde di calore marine, un aumento della frequenza, intensità e/o quantità di precipitazioni di eccezionale intensità su scala globale, nonché un aumentato del rischio di siccità nell'area del Mediterraneo. L'IPCC prevede, inoltre, che le variazioni di temperatura diventeranno sempre più ampie con una crescente diffusione del raggiungimento di temperature eccezionalmente alte durante la stagione estiva alle medie latitudini e durante la stagione invernale alle alte latitudini. Le zone più colpite da questi fenomeni saranno la parte centrale ed orientale del Nord America, l'Europa centrale e meridionale, l'area circostante il Mediterraneo (compresi l'Europa meridionale, l'Africa settentrionale e il Medio Oriente), l'Asia occidentale e centrale e l'Africa meridionale. Le aree che registreranno i maggiori aumenti degli eventi di precipitazione di intensità estrema sono le regioni ad alta latitudine (ad esempio Ala-

⁹ Per i dettagli degli scenari ipotizzati si rimanda a <https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018-Dic/Action%20Plan%202018.pdf>

ska, Canada, Groenlandia, Islanda, Europa settentrionale e Asia settentrionale), le regioni montuose (ad esempio, l'altopiano tibetano), e l'Asia orientale (compresi Cina e Giappone e il Nord America orientale). I cicloni tropicali diminuiranno in frequenza ma la loro intensità aumenterà notevolmente.

Dal punto di vista economico l'impatto maggiore dei cambiamenti in corso si registra e si registrerà ulteriormente nel settore energetico, in quello alimentare ed in quello idrico, con effetti che potranno sovrapporsi nello spazio e nel tempo, esponendo un numero crescente di persone e regioni, in particolare i piccoli stati insulari e le popolazioni economicamente svantaggiate, al rischio di mancanza di energia, cibo ed acqua. L'oceano ha assorbito circa il 30% dell'anidride carbonica antropogenica, con conseguente acidificazione delle acque ed aumento del rischio di sopravvivenza, crescita e sviluppo di numerose specie di esseri viventi marini, nonché di settori come l'acquacoltura e la pesca. Il settore turistico, in particolare quello stagionale balneare e sciistico, sono già stati notevolmente colpiti dagli effetti negativi del cambiamento climatico. I rischi per il turismo costiero, in particolare nelle regioni subtropicali e tropicali, aumenteranno con l'aumento della temperatura (a causa, ad esempio, di ondate estreme di calore e tempeste), l'erosione delle spiagge ed il ridursi della barriera corallina. Più in generale, la crescita economica sarà negativamente influenzata dal riscaldamento globale soprattutto nelle regioni a basso e medio reddito (continente africano, sud-est asiatico, India, Brasile e Messico).

Anche la salute umana è e sarà sempre di più influenzata dal riscaldamento globale, con un aumento della morbilità e della mortalità legate al calore in particolare nelle aree urbane, che spesso amplificano gli impatti negativi sulla salute delle ondate di calore. Si prevede, inoltre, l'aumento di alcune malattie veicolate dalle punture degli insetti come la malaria e la febbre dengue. Si prevedendo, infine, crescenti fenomeni migratori originati dalle comunità maggiormente dipendenti dall'agricoltura e più esposte ai rischi di impoverimento generati dai cambiamenti climatici in corso¹⁰.

La quantificazione monetaria dei costi sociali generati dai gas ad effetto serra è particolarmente complessa essendo influenzata da numerosi fattori fra cui: il fatto che l'effetto serra è legato alla concentrazione dei gas in atmosfera e non direttamente alle emissioni ed il fatto che tanto la variazione della temperatura e dei relativi fenomeni meteorologici, quanto gli impatti sull'ecosistema e sul sistema economico differiscono a seconda dell'area geografica e dell'orizzonte temporale considerati. Le stime variano, inoltre, in funzione della metrica utilizzata per misurare la variazione della ricchezza causata dal riscaldamento globa-

¹⁰ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf

le, degli obiettivi e della struttura del modello utilizzato per stimare gli impatti fisici del riscaldamento globale, del valore dei parametri impiegati nel modello, e delle ipotesi formulate per sviluppare le analisi di scenario (Nordhaus, 2007). Il risultato dell'enorme varietà dei metodi, dei modelli e dei parametri impiegati per ottenere la stima del costo sociale delle emissioni di CO₂ è rappresentato dall'impressionante ampiezza dei valori pubblicati in letteratura che, come recentemente riportato da Nocera et al. (2015), variano da \$-10 a \$7.244 a tonnellata di CO₂. Fra le stime più accreditate merita citare la relazione Stern che, nel 2006, indicava come la gestione del riscaldamento globale sarebbe costata circa l'1 % del PIL mondiale l'anno, mentre il costo dell'inazione sarebbe stato pari almeno la 5 % del PIL, fino ad arrivare al 20 % del PIL globale nello scenario peggiore fra quelli ipotizzabili¹¹.

La letteratura economica propone tre tipologie di strumenti per mitigare il problema delle emissioni di inquinanti atmosferici (Baldwin et al., 2001; Pearman et al., 2003; Stavins, 1997). Il primo attiene alla sfera istituzionale e prevede la diffusione e la divulgazione delle informazioni relative, da un lato, alla quantità di emissioni prodotte dalle attività di produzione o di consumo di beni e servizi, e, dall'altro, all'impatto causato dal riscaldamento globale sull'ecosistema, sulla salute dell'uomo, sul sistema economico e sui fenomeni migratori al fine di indurre comportamenti di produzione e consumo più sostenibili (Whitmarsh et al., 2011; Ockwell et al., 2009; Tews et al., 2003). Da questo punto di vista, negli ultimi anni, le campagne divulgative sui temi inerenti il cambiamento climatico sono andate decisamente intensificandosi e la consapevolezza e la sensibilità collettiva per questo fenomeno inizia ad aumentare. Il risultato è da ascrivere non solo alle campagne informative veicolate dai media, dalle associazioni ambientaliste e dallo stesso ministero dell'ambiente, che opera anche attraverso le agenzie regionali per la protezione ambientale, ma anche ad un orientamento maggiormente votato alla sostenibilità ambientale adottato dalle imprese, che sempre più spesso pubblicano (nel bilancio sociale o nelle etichette dei prodotti in vendita) i dati relativi all'impatto ambientale generato dalla produzione e dalla distribuzione dei beni e dei servizi che offrono alla collettività. L'ampia diffusione delle certificazioni ambientali utilizzate nel settore dei generi di consumo alimentari, ma più recentemente anche dei prodotti per la cura della persona e dell'abbigliamento, testimoniano l'efficacia di questo strumento e l'appealing esercitato nei confronti dei consumatori e dei produttori. Il limite maggiore di questo tipo di strumento è che, per quanto possa incidere sul livello di consapevolezza delle ripercussioni ambientali delle scelte di consumo o di produzione effettuate, non garantisce il cambiamento comportamentale desiderato dal decisore pubblico.

¹¹ www.europarl.europa.eu/factsheets/it

Una seconda tipologia di strumenti è basata sulla regolamentazione delle attività di consumo o produzione. In questa categoria rientra la normativa che definisce: la quantità massima di inquinamento che è permesso generare all'atto della produzione o del consumo di un bene; la tipologia di fattori produttivi e/o la tecnologia da impiegare per la produzione di un bene; la localizzazione delle attività produttive e più in generale la destinazione d'uso del territorio. Questi strumenti sono conosciuti in letteratura come "command and control instruments" e presentano alcuni noti limiti, ad esempio non incentivano a migliorare la sostenibilità ambientale dell'attività regolamentata oltre lo standard stabilito, possono essere molto complessi nonché costosi da gestire per il regolatore, tanto per la difficoltà di adeguare tempestivamente i limiti imposti all'evoluzione della tecnologia ed alle mutate condizioni del mercato, quanto per la necessità di approntare efficaci campagne di controllo al fine della verifica del rispetto della normativa vigente, infine, non tengono conto del fatto che i costi di adeguamento alla normativa possono differire notevolmente fra i diversi agenti economici regolamentati ed in questo senso risultano meno efficienti rispetto ad altri tipi di strumenti basati sui "segnali di prezzo" (imposte vs. sussidi). Il maggior vantaggio di questo tipo di strumenti è la rapidità con cui, potenzialmente, possono modificare l'adozione di nuove tecnologie a minor impatto ambientale e la certezza che gli obiettivi di limitazione dell'inquinamento perseguiti vengano raggiunti.

Una terza tipologia di strumenti è veicolata dal mercato, è, infatti, definita in letteratura come "market-based" e comprende i sussidi, le imposte ed i permessi scambiabili (Stavins, 2003). I sussidi vengono erogati al fine di promuovere comportamenti virtuosi che riducono l'inquinamento. Possono riguardare tanto le attività di consumo che quelle inerenti la produzione di beni o servizi, compreso l'acquisto di fattori produttivi tecnologicamente avanzati a minor impatto ambientale. Questa categoria di strumenti è generalmente molto apprezzata dai destinatari, si caratterizza quindi per un'accettabilità politica molto alta, presenta, però, numerosi limiti, primo fra tutti la necessità di disporre di un'adeguata disponibilità finanziaria da parte degli enti erogatori. Comporta, inoltre, problemi di equità, perché prevede il trasferimento di risorse dalla fiscalità generale a gruppi specifici e limitati di individui o imprese, e risulta efficiente solo se il costo opportunità è sufficientemente basso. Le imposte, viceversa, raccolgono gettito dai consumatori o dai produttori che inquinano in modo proporzionale al valore monetario dell'inquinamento prodotto. Questo strumento presenta il notevole vantaggio di generare un doppio beneficio: riduce l'inquinamento e genera risorse che possono essere utilizzate per neutralizzare le distorsioni del mercato causate da altre imposte (Goulder, 1995; Parry & Bento, 1999; Parry, 1995; Pearce, 1991), non è, però, privo di limiti. Prima di tutto è generalmente poco gradito dall'elettorato e quindi viene difficilmente proposto e sostenuto dal decisore

pubblico. In secondo luogo, per essere efficiente, richiederebbe di variare l'imposta al variare del valore monetario del costo sociale dell'inquinamento prodotto da ogni agente economico, con enormi difficoltà di definizione dell'importo da far pagare e di controllo del pagamento. Nella pratica, infatti, l'imposta è normalmente proporzionale al costo medio (anziché a quello marginale) generato da tutti gli agenti economici. Fra gli altri limiti si citano, inoltre, la potenziale regressività dell'imposta, il potenziale effetto negativo sulla crescita economica, il costo di gestione della riscossione e del controllo dei pagamenti, ma soprattutto il rischio che gli agenti economici si trasferiscano in regioni dove l'imposta non viene applicata. Con i permessi scambiabili, invece, terza tipologia di strumento di tipo "market-based", il regolatore definisce la quantità di inquinamento complessivamente producibile dagli agenti economici e stabilisce una prima ripartizione dei permessi fra gli agenti stessi, lasciando loro la possibilità di scambiarsi i permessi in un libero mercato creato all'uopo previo il pagamento di un prezzo definito dall'interazione fra la domanda e l'offerta. Rispetto allo strumento del sussidio o dell'imposizione fiscale, il sistema dei permessi scambiabili ha il notevole vantaggio di garantire il rispetto del limite massimo di inquinamento producibile nel sistema complessivamente considerato così come definito dal regolatore (Kaplow, 2010). Le criticità legate a questo strumento riguardano, però, la definizione della quantità di permessi e di inquinamento producibile, che deve essere in linea con gli obiettivi di politica ambientale stabiliti, e l'incertezza relativa al prezzo dei permessi (Fankhauser et al, 2010), l'incentivo ad adottare un comportamento virtuoso da parte degli agenti economici ed ad innovare la tecnologia utilizzata, infatti, è strettamente legato al prezzo dei permessi ed alla prevedibilità del valore che il prezzo avrà in futuro. Nel caso in cui il prezzo sia troppo basso o troppo volatile, l'incentivo ad adottare comportamenti virtuosi e ad usare tecnologie innovative a minor impatto ambientale potrebbe risultare inferiore all'obiettivo perseguito dal decisore pubblico. Anche in questo caso, inoltre, i costi di gestione, ma soprattutto di controllo del rispetto della normativa, possono essere ingenti. Un'ulteriore ragione per cui un'imposta sulle emissioni di CO₂ sarebbe preferibile al sistema delle quote e dei permessi scambiabili è legata all'andamento dei benefici e dei costi dell'abbattimento delle emissioni, è stato infatti, dimostrato che in presenza di benefici marginali tendenzialmente lineari e leggermente decrescenti e di costi marginali non lineari fortemente crescenti, come nel caso in esame, lo strumento fiscale è più efficiente (McKibbin & Wilcoxon, 2002; Pizer, 2002 e 1997).

Il controllo e la regolamentazione delle emissioni di CO₂ e dei gas ad effetto serra presentano, però, delle peculiarità rispetto alle altre forme di inquinamento atmosferico perché, a differenza degli altri inquinanti, i gas serra producono effetti che si estendono a livello globale, anziché locale, richiedendo perciò

l'accordo e la cooperazione di più nazioni, possibilmente quelle maggiormente inquinanti, affinché un qualunque programma di riduzione delle emissioni risulti efficace. Purtroppo, l'incentivo a raggiungere accordi di tipo cooperativo è intrinsecamente molto basso, poiché i costi di abbattimento delle emissioni generano benefici solo in parte goduti dal paese e dalla generazione che ne sopporta l'onere. L'impasse è riconducibile al fenomeno noto in teoria dei giochi come "dilemma del prigioniero" per cui, nonostante l'esito della cooperazione sia per tutti preferibile all'esito in assenza di cooperazione, la possibilità che i partner "devino" dall'accordo, lasciando l'onere dell'impegno preso a chi intenda rispettarlo ed i maggiori benefici netti in capo a chi non rispetta l'accordo, porta alla mancata stipula dell'accordo tout court. In assenza di un'ampia, se non totale, cooperazione internazionale, del resto, l'azione del singolo paese è da un lato poco utile, anche per il fenomeno della migrazione delle attività produttive che generano emissioni nei paesi non aderenti, fenomeno noto come "carbon leakage" (Kuik & Mulder, 2004) e dall'altro difficilmente accettabile da parte dell'elettorato¹². Inoltre, quand'anche raggiunto, l'incentivo a rispettare l'eventuale accordo sarebbe minimo, perché non esiste, ed è difficilmente immaginabile che esista, un ente o un'agenzia sovranazionale investita di poteri sanzionatori nei confronti dei paesi che non rispettano gli impegni presi. Un ulteriore elemento che complica il raggiungimento di un accordo internazionale sulla riduzione delle emissioni è dovuto al fatto che i paesi che sono destinati a sopportare gli impatti maggiori del riscaldamento globale e che quindi sono maggiormente interessati a che la cooperazione venga posta in essere, sono anche i paesi più poveri che hanno, perciò, minor potere persuasivo nel dibattito internazionale.

4. SOLUZIONI ADOTTATE PER RIDURRE LE EMISSIONI DI CO₂

Nessuno degli strumenti proposti in letteratura per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra è privo di criticità o di elementi che ne rendono complessa l'applicazione. Le soluzioni adottate dal decisore pubblico di cui si darà conto in questa Sezione rispecchiano il quadro delineato e spiegano almeno in parte il perché dei risultati poco soddisfacenti finora registrati.

I primi tentativi di cooperazione internazionale nella risoluzione del problema delle emissioni di CO₂ risalgono al 1988 con la Conferenza di Toronto in cui i

¹² Engel *et al.* (2005) dimostrano, però, da un lato come talvolta i paesi intraprendano azioni unilaterali anche in presenza di esternalità positive che beneficino paesi terzi, come nel caso dei paesi aderenti all'accordo di Parigi per quanto attiene alla riduzione di emissioni di CO₂, e dall'altro come siano proprio tali azioni unilaterali a facilitare il successivo raggiungimento di accordi collaborativi allargati.

partecipanti concordarono sulla necessità di ridurre le emissioni del 20% entro il 2005 rispetto ai valori registrati nel 1988. Si optò quindi per uno strumento di tipo “command-and-control” piuttosto che per un potenzialmente più efficiente “market-based” e da allora l’approccio è rimasto ancorato alla determinazione delle riduzioni delle quantità di emissioni, anziché all’introduzione di un’imposta sulle emissioni. Nella Conferenza sull’Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite (UNCED, United Nations Conference on Environment and Development) tenutasi a Rio de Janeiro del 1992, i 150 paesi partecipanti decisero di sottoscrivere una convenzione quadro sui cambiamenti climatici che prevedeva, fra le altre iniziative, l’istituzione degli inventari nazionali delle emissioni e degli assorbimenti dei gas ad effetto serra di cui, in Italia, è responsabile l’ISPRA. Nella conferenza di Berlino del 1995 si raggiunse un accordo sulla necessità di ridurre le emissioni al di sotto dei livelli del 1990, senza specificare però la soglia di riduzione.

È solo con la Conferenza di Kyoto, tenutasi nel 1997, ed il relativo protocollo¹³ che si stabilì l’entità della riduzione delle emissioni da raggiungere entro il 2012 rispetto ai valori del 1990. In particolare, per tutti i paesi membri dell’Unione Europea, il Protocollo di Kyoto stabilì una riduzione dell’8% delle emissioni di gas da effetto serra rispetto ai valori registrati nel 1990. L’Unione Europea definì, quindi, sulla base della conoscenza della struttura industriale, del mix energetico utilizzato e delle aspettative di crescita economica di ogni paese, le riduzioni che ciascun paese membro avrebbe dovuto rispettare. All’Italia venne assegnato un obbligo di riduzione di emissioni di gas serra pari al 6,5%. In Italia il Protocollo di Kyoto venne ratificato con la legge 120 del 2002¹⁴. L’accordo raggiunto nella Conferenza di Kyoto stabiliva, inoltre, l’istituzione di un sistema di permessi di emissione scambiabili, con la possibilità di utilizzare i permessi assegnati anche successivamente al 2012 e di acquisire crediti di emissione finanziando progetti di riduzione delle emissioni in paesi terzi, non necessariamente aderenti al protocollo. Il secondo periodo di adempimento del protocollo di Kyoto è iniziato nel 2013 e si concluderà nel 2020, durante questo periodo i paesi firmatari si sono impegnati a ridurre le emissioni almeno del 18% rispetto ai livelli del 1990¹⁵. L’UE si è data un obiettivo ancor più ambizioso e pari al 20%. Le critiche mos-

¹³ Per entrare in vigore il protocollo doveva essere ratificato da almeno 55 paesi che complessivamente producessero il 55% delle emissioni. Il protocollo perciò entrò in vigore solo il 16 febbraio 2005, dopo la ratifica della Russia. Gli Stati Uniti, invece, responsabili all’epoca del 36% delle emissioni, decisero di non aderire. Il Canada si è ritirato prima del 2012, ultimo anno del primo periodo di adempimento. Per approfondire <http://www.meteoweb.eu/2015/12/dak-yoto-a-parigi-cosa-e-cambiato-in-diciotto-anni-di-cop/598732/#oqg7fkXbmpA7AX9W.99>

¹⁴ <http://www.isprambiente.gov.it>

¹⁵ Russia, Giappone e Nuova Zelanda non hanno preso parte al secondo periodo. Questo significa che l’accordo di Kyoto si applica attualmente solo a circa il 14% delle emissioni mondiali.

se anche in letteratura al protocollo di Kyoto, però, sono numerose (Aldy et al., 2003), fra le più rilevanti si menziona il fatto che i paesi in via di sviluppo siano stati coinvolti solo in modo molto marginale.

Nel dicembre 2015, dopo oltre due decenni di negoziati, i governi hanno adottato il primo accordo universale per contrastare i cambiamenti climatici, in occasione della 21a conferenza delle parti (COP 21) della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) tenutasi a Parigi che ha stabilito l'obiettivo di mantenere l'aumento della temperatura al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali. Per conseguire tale obiettivo, le parti si sono proposte di stabilizzare quanto prima le emissioni di gas a effetto serra a livello mondiale e di conseguire l'obiettivo di zero emissioni nette nella seconda metà del secolo. L'accordo si basa sul principio delle responsabilità comuni ma differenziate in funzione delle rispettive capacità di contrasto al cambiamento climatico. Ogni cinque anni tutti i paesi devono rinnovare e aggiornare i propri piani d'azione e comunicarli in modo trasparente così da consentire il monitoraggio dei progressi raggiunti non solo a livello nazionale, ma anche a livello globale. L'accordo di Parigi è entrato in vigore nel 2016. Tutti i paesi dell'UE hanno ratificato l'accordo e l'Unione Europea sta già adottando misure per raggiungere il suo obiettivo di ridurre le emissioni almeno del 40% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030, di migliorare l'efficienza energetica del 27% e di aumentare la quota di consumo finale di energia proveniente da fonti rinnovabili del 27%¹⁶. In realtà, l'accordo ha fissato il limite di emissioni fino al 2030, ma a quasi cinque anni dalla sua ratifica il trend complessivo non è particolarmente incoraggiante: le emissioni globali nel 2015 e 2016 sono rimaste costanti, mentre nel 2017 e 2018 sono tornate a crescere. Inoltre USA, Australia e Brasile si sono ritirati dall'accordo a dimostrazione della già citata intrinseca instabilità degli accordi internazionali nella risoluzione di problemi inerenti beni pubblici transnazionali e transgenerazionali.

4.1 *Emissions Trading System (EU ETS)*

Sulla scorta di quanto previsto dal protocollo di Kyoto, l'Unione Europea nel 2005 ha dato vita all'Emissions Trading System (ETS) che opera secondo il principio della limitazione delle emissioni producibili e dello scambio dei permessi di emissione, "cap-and-trade". Il sistema stabilisce un tetto (cap), che si riduce

¹⁶ Gli obiettivi stabiliti per il 2030 fanno seguito a quelli stabiliti nel 2007 dai leader dell'UE per il 2020 noti come "20 - 20 - 20": una riduzione del 20 % delle emissioni di gas a effetto serra, un aumento del 20 % della quota di energie rinnovabili nel consumo finale di energia e una riduzione del 20 % del consumo totale di energia primaria dell'UE rispetto ai livelli del 1990.

nel tempo, alla quantità totale di alcuni gas da effetto serra che possono essere emessi dagli impianti regolamentati. Il sistema opera in 31 paesi: i 28 Stati membri dell'UE, l'Islanda, il Liechtenstein e la Norvegia. Copre attualmente la metà delle emissioni di CO₂ dell'UE, comprendendo quelle provenienti da circa 12.000 impianti, fra centrali elettriche e impianti industriali, oltre a circa 500 operatori aerei commerciali e non commerciali che volano tra gli aeroporti nello Spazio Economico Europeo (SEE). Entro il limite stabilito, le imprese ricevono o acquistano permessi di emissione e, se necessario, possono scambiarli sul mercato. Il valore delle quote scambiate è tanto maggiore quanto più stringente è il limite stabilito. Le imprese possono anche acquistare quantità limitate di crediti di emissione internazionali da progetti di riduzione delle emissioni realizzati in altri parti mondo. Alla fine di ogni anno le imprese devono restituire un numero di permessi pari alle emissioni prodotte, pena il pagamento di ammende pecuniarie. Se un'impresa riduce le proprie emissioni, può mantenere i permessi inutilizzati per coprire il fabbisogno futuro, oppure può venderli ad un'altra impresa che ne non ne abbia a sufficienza. Secondo le previsioni dell'UE nel 2020 le emissioni dei settori regolamentati saranno inferiori del 21% rispetto al 2005, mentre nel 2030 saranno inferiori del 43%. Per quanto attiene alle emissioni di CO₂ i settori interessati sono la produzione di energia elettrica e di calore, i settori industriali ad alta intensità energetica, comprese raffinerie di petrolio, acciaierie e produzione di ferro, metalli, alluminio, cemento, calce, vetro, ceramica, pasta di legno, carta, cartone, acidi e prodotti chimici organici su larga scala, e l'aviazione civile. In alcuni settori sono inclusi soltanto gli impianti al di sopra di una certa dimensione, alcuni impianti di dimensioni ridotte possono essere esclusi qualora le amministrazioni mettano in atto misure fiscali o di altro genere che ne riducano le emissioni di un quantitativo equivalente. L'ETS è attualmente nella sua terza fase di funzionamento (2013-20) e, rispetto alle due fasi precedenti, si caratterizza per le seguenti differenze: il limite di emissioni non è più differenziato per nazione ma è unico per tutti i paesi aderenti; i permessi vengono assegnati mediante asta anziché gratuitamente; il numero di settori interessati e di gas regolamentati è maggiore; si è istituito un "fondo" di 300 milioni di quote accantonate per i nuovi entranti ed un fondo per finanziare la diffusione di tecnologie innovative, la produzione di energia da fonti rinnovabili e la cattura e l'immagazzinamento della CO₂.

Nel settore dell'aviazione e fino al 31 dicembre 2023 il sistema ETS UE si applica unicamente ai voli tra aeroporti situati nello Spazio Economico Europeo (SEE). Il trasporto aereo è stato incluso nell'ETS nel 2008. Da allora le emissioni del trasporto aereo che si svolge all'intero dello SEE sono soggette agli obiettivi dell'UE di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 20% e del 40% entro, rispettivamente, il 2020 e il 2030 e fanno, quindi, parte del contributo

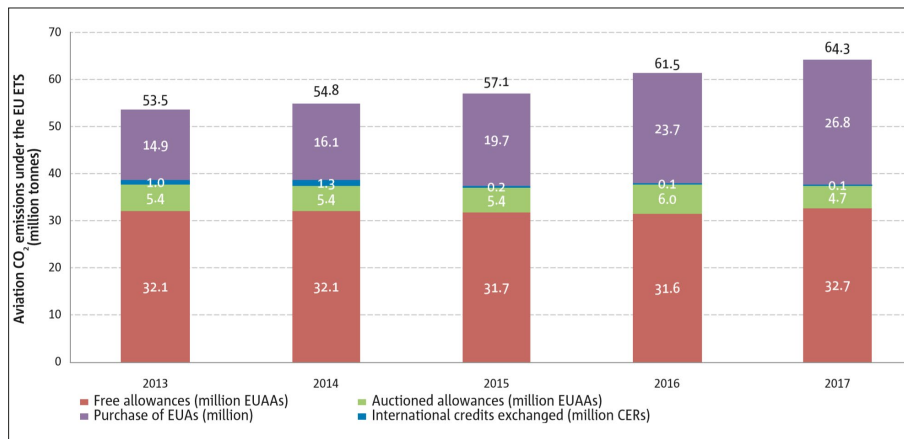
dell'UE al raggiungimento degli obiettivi dell'accordo di Parigi. Il limite iniziale per l'aviazione nell'ETS era basato sulle emissioni storiche medie del trasporto aereo tra il 2004 e il 2006, pari a 221,4 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno per tutti i paesi partecipanti. Il limite per le attività di trasporto aereo fissato per l'attuale fase dell'ETS (2013-2020) è stato fissato pari al 95% delle emissioni storiche registrate nel 2004-2006. Nel 2017, 677 compagnie aeree, tra cui oltre 200 vettori non europei, hanno operato nell'ambito dell'ETS. Dal 2013, l'ammontare annuale delle unità di emissione destinate dall'ETS al trasporto aereo è stato di circa 37,5 milioni di tonnellate di CO₂. Circa il 15% di queste unità di emissione è stato messo all'asta, mentre l'85% è stato assegnato gratuitamente. Per le emissioni di CO₂ che superano il massimale stabilito dall'ETS per l'aviazione, gli operatori aerei devono acquistare unità di emissione nell'apposito mercato istituito dall'UE per gli altri settori produttivi ad impianti fissi che emettono gas ad effetto serra. L'acquisto di unità di emissione da parte del settore dell'aviazione è passato da 14,9 milioni di tonnellate nel 2013 a 26,8 milioni di tonnellate nel 2017 (European Commission, 2017).

I prezzi delle unità di emissione del carbonio sono cresciuti da €4 a €6 per tonnellata di CO₂ nel periodo 2013-2017. Di conseguenza, i costi totali delle compagnie aeree relativi all'acquisto di unità di emissioni sono passati da circa 89 milioni di euro nel 2013 a 189 milioni di euro nel 2017. Per il 2017, si stima che tali costi abbiano rappresentato circa lo 0,3% dei costi operativi totali dei voli che rientrano nell'ambito di applicazione dell'ETS. A partire da settembre 2018 il prezzo delle unità di emissione è salito oltre i €20¹⁷ e nel primo semestre del 2019 si è assestato attorno ai €24, si prevede, perciò, che l'impatto sui costi operativi del settore avionico sarà maggiore. La riduzione stimata di emissioni di CO₂ nel settore del trasporto aereo grazie all'ETS nel periodo 2013-2020 è di 193,4 milioni di tonnellate.

Nella quarta fase di funzionamento dell'ETS (2021-2030) in ottemperanza agli obiettivi di riduzione delle emissioni dell'UE per il 2030, in linea con il quadro delle politiche per il clima e l'energia per il 2030 e come parte del contributo dell'UE all'accordo di Parigi del 2015, si prevede di: aumentare il ritmo delle riduzioni annuali delle quote al 2,2% a partire dal 2021 e di rafforzare la riserva stabilizzatrice del mercato (il meccanismo istituito dall'UE nel 2015 per ridurre l'eccedenza di quote di emissioni nel mercato del carbonio e migliorare la resilienza dell'ETS dell'UE agli shock futuri); proseguire con l'assegnazione gratuita di quote a garanzia della competitività internazionale dei settori industriali esposti al rischio di rilocalizzazione delle emissioni di carbonio, garantendo al

¹⁷ <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction/european-emission-allowances-auction-download>

Figura 4 – Emissioni di CO₂ nel settore aereo nell’ambito dell’ETS nel periodo 2013-2017 (1 unità di emissione – EUAA o EUA – equivale a 1 tonnellata di CO₂) European Commission, 2017



tempo stesso che le regole per determinare l’assegnazione gratuita siano mirate e riflettano il progresso tecnologico; aiutare l’industria e il settore energetico a rispondere alle sfide dell’innovazione e degli investimenti richiesti dalla transizione verso un’economia a basse emissioni di carbonio attraverso vari meccanismi di finanziamento¹⁸. Il fattore di riduzione lineare del 2,2% all’anno verrà applicato anche al trasporto aereo. Le riduzioni delle emissioni dovranno essere esclusivamente nazionali.

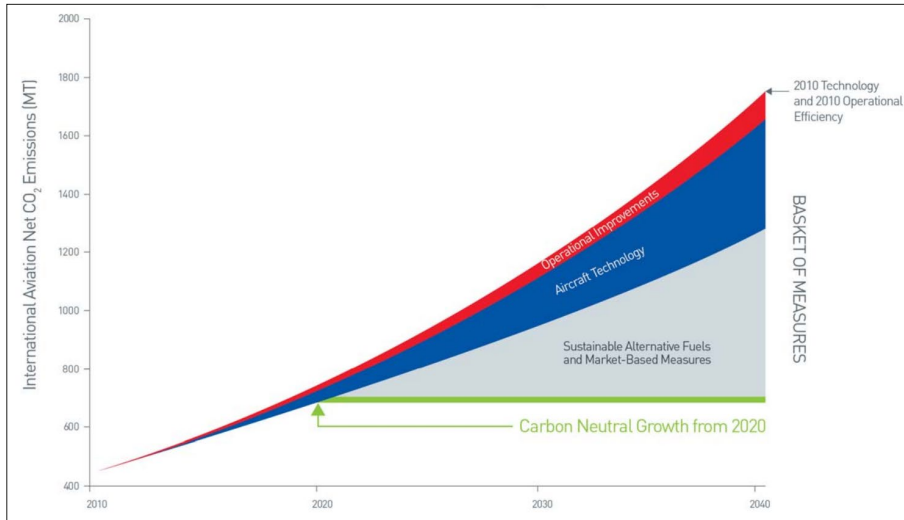
4.2 Carbon Offsetting Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)

Nell’Ottobre del 2013, l’International Civil Aviation Organisation (ICAO) ha approvato la “Risoluzione A39-3” con cui incentiva l’adozione di tecnologia avionica avanzata a minor impatto ambientale e pratiche operative più efficienti che riducano il consumo energetico e l’emissione di CO₂. La risoluzione stabilisce anche di utilizzare a partire dal 2020 un sistema di acquisto e scambio di crediti di compensazione per le emissioni generate dal trasporto aereo internazionale che si svolge al di fuori dello Spazio Economico Europeo e che non sono coperte dall’ETS.

¹⁸ https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_it

Figura 5 – Misure stabilite dall'ICAO per ridurre le emissioni di CO₂ prodotte dal trasporto aereo

https://www.icao.int/Meetings/RS2017/Documents/CORSIA_Seminar_1.%20Introduction_ver04.pdf



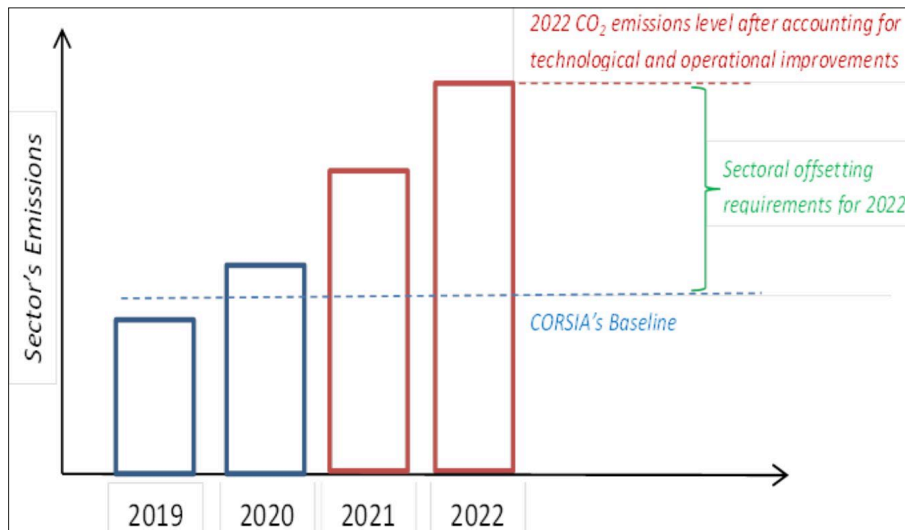
La risoluzione, che coinvolge 193 nazioni, definisce i criteri del Carbon Offsetting Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) che ha lo scopo di contribuire, congiuntamente ad altre misure fra cui lo sviluppo tecnologico, l'uso di biocarburanti¹⁹ e l'ottimizzazione delle rotte, al raggiungimento dell'obiettivo della crescita zero delle emissioni di CO₂ prodotte dal trasporto aereo internazionale a partire dal 2020 (Carbon Neutral Growth 2020) e di ridurre le emissioni ad un livello pari alla metà delle emissioni prodotte nel 2005 entro il 2050.

CORSIA si basa sulla compravendita di crediti compensativi. I crediti compensativi certificano la quantità di riduzione di CO₂ realizzata attraverso progetti di varia natura tra cui: la costruzione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili, la riforestazione o la destinazione ad uso boschivo di territori viceversa impiegati per attività produttive o residenziali (ad es. REDD+, Reduce Emissions from Deforestation and forest Degradation²⁰), la

¹⁹ I biocarburanti che sono già utilizzati su alcuni voli commerciali, hanno il potenziale di ridurre le emissioni fino all'80% (<https://www.iata.org/policy/environment/Documents/paper-offsetting-for-aviation.pdf>).

²⁰ La deforestazione e il degrado delle foreste sono la seconda causa principale del riscaldamento globale e sono responsabili di circa il 15% delle emissioni globali di gas serra. A differenza delle attività di rimboscimento, che generalmente garantiscono piccoli cambiamenti

Figura 6 – Livello base di riferimento delle emissioni di gas serra stabilito da CORSIA
https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Update_9Aug18.pdf



gestione dei rifiuti. Più nello specifico ogni credito compensativo rappresenta la certificazione che una tonnellata di CO₂ è stata ridotta o è stata evitata grazie al progetto realizzato e che il progetto non sarebbe stato realizzato senza la compravendita dei relativi crediti compensativi. Per garantire la coerenza dei progetti finanziati con gli obiettivi di CORSIA ed evitare l'eventuale doppio conteggio²¹, solo i progetti certificati dall'ICAO che rispettano i criteri di conformità stabiliti dallo stesso potranno essere considerati utili ai fini dell'emissione e della compravendita dei crediti compensativi. CORSIA si basa sul confronto delle emissioni totali di CO₂ per l'anno in esame rispetto al livello base fissato dall'ICAO pari alla media delle emissioni di CO₂ del trasporto aereo internazionale per gli anni 2019 e 2020. Eventuali emissioni di CO₂ eccedenti il livello base andranno compensate con l'acquisto di una pari quantità di crediti compensativi.

annuali negli stock di carbonio per lunghi periodi di tempo, la deforestazione provoca grandi cambiamenti negli stock di carbonio in un breve periodo di tempo. La maggior parte delle emissioni provocate dalla deforestazione avviene rapidamente, mentre la rimozione del carbonio dall'atmosfera attraverso attività di rimboscimento è un processo molto più lento.

²¹ Che potrebbe verificarsi se i crediti venissero attribuiti anche a progetti che sarebbero stati comunque realizzati.

Figura 7 – Fasi di implementazione di CORSIA

https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Update_9Aug18.pdf

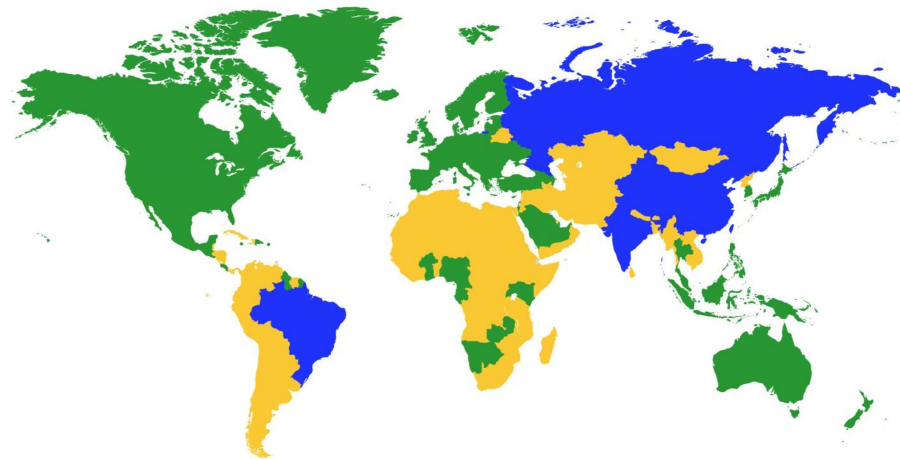


In ottemperanza a quanto stabilito da CORSIA, dal 1 gennaio 2019, tutte le compagnie aeree con voli internazionali che producono emissioni annue di CO₂ superiori a 10.000 tonnellate, sono tenute a monitorare, verificare e comunicare le emissioni di CO₂ prodotte durante il 2019 ed il 2020²². Le emissioni medie annue di CO₂ riportate durante tale periodo rappresenteranno il livello base che, secondo CORSIA, a partire dal 2021 non potrà essere superato dalle compagnie aeree se non previo l'acquisto di crediti compensativi.

Dal 2021 in poi ogni volo internazionale rientrante nell'ambito di applicazione di CORSIA sarà attribuito ad un operatore aereo e ogni operatore aereo sarà attribuito a uno Stato che dovrà presentare il piano di monitoraggio delle emissioni all'ICAO. Gli operatori aerei controlleranno, verificheranno e comunicheranno il loro consumo di carburante allo Stato di assegnazione che ne verificherà i requisiti annuali di compensazione e trasferirà le informazioni ricevute all'ICAO. Le compagnie aeree dovranno rispettare i limiti di emissione definiti da CORSIA nell'arco di un periodo di 3 anni acquistando crediti compensativi e cancellando le unità di emissione che superano tali limiti. I dettagli relativi alla cancellazione delle unità di emissione saranno verificati da un'agenzia indipendente prima di essere trasmessi dalla compagnia aerea allo Stato di assegnazione. Gli operatori aerei potranno ridurre i loro requisiti di compensazione anche utilizzando i biocarburanti che soddisfano i criteri di sostenibilità definiti da CORSIA.

²² Le operazioni umanitarie, mediche e antincendio sono esentate.

Figura 8 – Nazioni che da Maggio 2019 partecipano alla fase pilota (verde), esonerate (gialle) e che dovranno aderire entro il 2027 (blu)
<https://www.iata.org/policy/environment/Documents/corsia-factsheet.pdf>



L'applicazione di CORSIA si articolerà in tre fasi: una fase pilota (2021-2023) ed una prima fase (2024-2026) con partecipazione su base volontaria e una seconda fase (2027-2035) con partecipazione obbligatoria. La differenza fra la fase pilota e la prima fase riguarda la definizione dell'anno rispetto al quale calcolare la quantità di emissioni da compensare. Nella fase pilota è possibile scegliere fra l'anno in corso oppure l'anno 2020; nella prima fase, invece, il livello base è dato dalla media delle emissioni del 2019 e del 2020 e la quantità da compensare è da calcolarsi rispetto all'anno in corso.

Sono esonerati dalla partecipazione a CORSIA le nazioni la cui quota di tonnellate-km nel 2018 era inferiore allo 0,5% o che non figurano nell'elenco ordinato decrescente delle nazioni che comprendono il 90% del totale delle tonnellate-km. Sono inoltre esclusi a prescindere dalla quota di tonnellate-km le nazioni che rientrano nella categoria dei paesi meno sviluppati, comprese le isole, e le nazioni in via di sviluppo senza sbocco sul mare, che possono comunque aderire su base volontaria.

A maggio 2019 erano 80 gli stati volontariamente aderenti a CORSIA e responsabili di poco meno dell'80% del trasporto aereo internazionale. L'ICAO prevede che grazie a CORSIA l'aviazione internazionale ridurrà le emissioni di CO₂ mediamente di 165 milioni di tonnellate l'anno. Le emissioni annuali che verranno ridotte attraverso il meccanismo della compensazione aumenteranno da circa 19 milioni di tonnellate nel 2021 a 335 milioni di tonnellate entro il 2035. L'ICAO prevede anche che tra il 2021 ed il 2035 CORSIA ridurrà circa 2,5

miliardi di tonnellate di CO₂ e genererà oltre 40 miliardi di dollari utilizzabili per finanziare progetti di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra²³.

L'ICAO ha preferito adottare un sistema basato sulla riduzione certificata delle emissioni piuttosto che sull'istituzione di un'imposta sulla CO₂ prodotta ritenendolo più direttamente collegato all'obiettivo della quantità da ridurre dei gas ad effetto serra²⁴. Il sistema di compensazione è stato ritenuto una soluzione più efficiente rispetto ad una "carbon tax" poiché permette che le riduzioni delle emissioni che non possono essere realizzate in modo economicamente sostenibile nel settore dell'aviazione possano essere compensate con le riduzioni effettuate in altri settori in cui sono più rapidamente ed economicamente realizzabili. In linea teorica ai fini della mitigazione del problema del riscaldamento climatico il meccanismo della compensazione intersettoriale è equivalente a quello della riduzione delle emissioni intrasettoriale, poiché ciò che conta è la riduzione della quantità di emissioni prodotte indipendentemente dal settore in cui esse vengono realizzate. I tassi di crescita del settore avionico potrebbero, però, mettere in evidenza i limiti di questa scelta.

4.3 *Il mercato volontario dei crediti compensativi*

I crediti compensativi possono essere scambiati nei mercati volontari, dove gli acquirenti e i venditori agiscono su base volontaria, o in ottemperanza alla normativa vigente che permette agli emittenti di compensare (in parte) le proprie emissioni con l'acquisto di una pari quantità di crediti compensativi. La maggioranza dei progetti finanziati attraverso il mercato volontario segue regole e procedure stabilite da standard volontari sulla riduzione del carbonio. Esistono numerosi standard che vengono utilizzati per certificare l'emissione di crediti compensativi (i più importanti sono quelli certificati da Verra, Gold Standard, Plan Vivo, Climate Action Reserve e American Carbon Registry) ma sono tutti accomunati da 4 criteri fondamentali: il progetto deve effettivamente ridurre le emissioni di CO₂ (real); la riduzione non sarebbe avvenuta se il progetto non fosse stato realizzato (additional); la quantità di riduzione di emissioni può essere accuratamente misurata (measurable); la riduzione di emissioni è stata verificata da un ente certificatore terzo (verifiable).

I progetti che danno origine ai crediti compensativi possono riguardare otto macro settori: agricoltura, industria, efficientamento energetico, gestione e protezione delle aree boschive, efficientamento utensili domestici nei paesi in via

²³ <https://www.iata.org/policy/environment/Pages/corsia.aspx>

²⁴ <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/corsia-factsheet-carbon-pricing.pdf>

Tabella 1 – Numero di progetti e quantità di emissioni compensate per macro settore

Project Categories	Projects with Issued Offsets	Volume of Offsets Issued in MtCO _{2e} (2005 - Present) ⁴
Agriculture – modifying agricultural practices to reduce emissions by switching to no-till farming, reducing chemical fertilizer use, etc.	87	6.7
Chemical Processes and Industrial Manufacturing – modifying industrial processes to emit fewer greenhouse gases.	72	63.5
Energy Efficiency and Fuel Switching – improving energy efficiency or switching to cleaner fuel sources.	633	127.9
Forestry and Land Use – managing forests, soil, grasslands, and other land types to avoid releasing carbon and/or increasing the amount of carbon the land absorbs.	170	95.3
Household Devices – distributing cleaner-burning stoves or water purification devices to reduce or eliminate the need to burn wood (or other inefficient types of energy).	161	23.4
Renewable Energy – installing solar, wind, and other forms of renewable energy production.	611	61.9
Transportation – increasing access to public and/or alternative transportation (like bicycling) and reducing emissions from private transportation like cars and trucks.	43	1.1
Waste Disposal – reducing methane emissions from landfills or wastewater, often by collecting converting it to usable fuel.	238	57.5

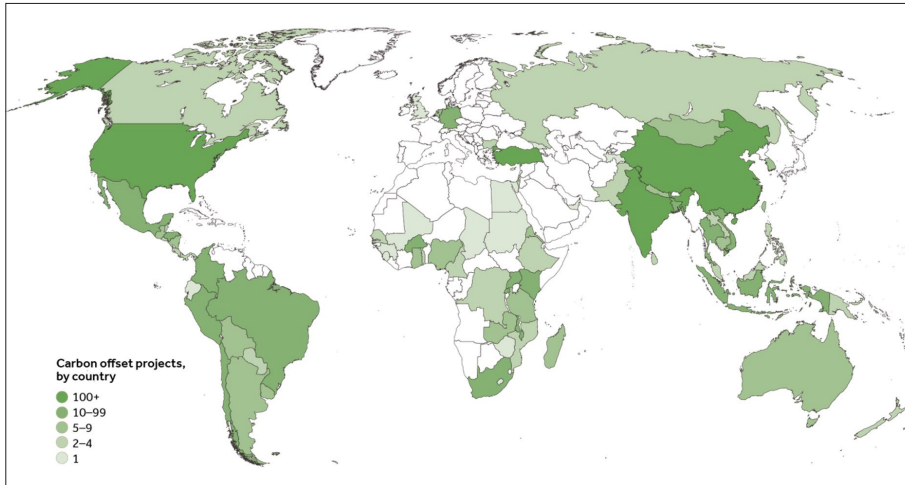
Fonte: https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2018/09/VCM-Q1-Report_Full-Version-2.pdf

di sviluppo, produzione di energia da fonti rinnovabili, trasporti e gestione dei rifiuti. Come illustrato nella Tabella 1 i settori che hanno originato la maggior quantità di crediti compensativi sono l'efficientamento energetico e la gestione e protezione delle aree boschive.

Se un progetto soddisfa i criteri definiti dallo standard, verranno emessi tanti crediti compensativi quante sono le corrispondenti riduzioni di emissioni di carbonio. Ad ogni credito compensativo verrà assegnato un numero seriale che verrà annotato in un apposito registro in cui verranno tracciate tutte le transazioni relative al credito, compresa la sua cancellazione quando verrà utilizzato per compensare un'emissione di CO₂ di pari entità. Gli sviluppatori del progetto possono quindi negoziare queste compensazioni direttamente con gli acquirenti finali, che possono rivendicare le riduzioni delle emissioni come proprie ritirando e cancellando i relativi crediti, oppure possono venderli a mediatori o broker, che a loro volta rivenderanno i crediti agli acquirenti finali previo il pagamento

Figura 9 – Localizzazione dei progetti realizzati dal 2008 al 2018

https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2018/09/VCM-Q1-Report_Full-Version-2.pdf



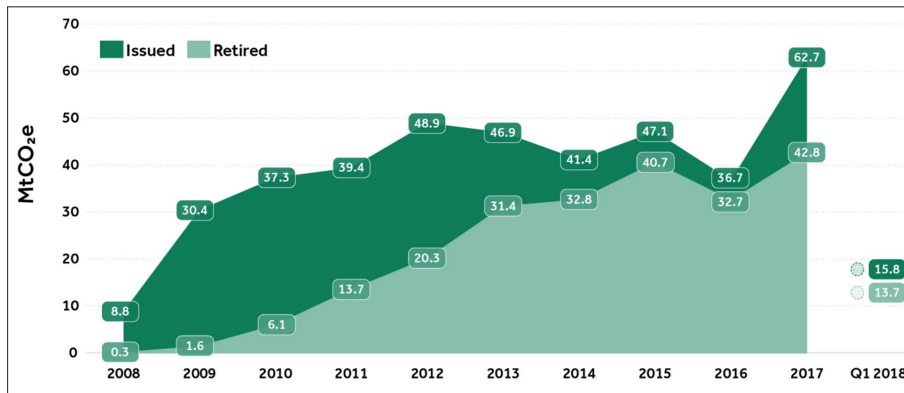
di una commissione di intermediazione. Nonostante un credito compensativo possa essere emesso e possa essere cancellato una sola volta, esso può essere acquistato e rivenduto numerose volte prima della sua cancellazione. Più numerosi sono i passaggi ed i relativi costi di transazione, meno efficiente risulta il meccanismo di mercato.

La maggior parte dei progetti finanziati attraverso la compravendita dei crediti compensativi sono stati realizzati in Asia (51%) ed in Nord America (18%) come illustrato nella Figura 9.

La quantità di emissioni ridotte, sequestrate o evitate dal 2005 al 2017 è stato pari a 437 milioni di tonnellate, di cui ben 63 milioni solo nell'ultimo anno del periodo considerato.

Il numero di crediti compensativi emessi e di crediti compensativi cancellati sono utili indicatori dell'offerta e della domanda nel mercato volontario, poiché i crediti emessi (area verde scuro in Figura 10) rappresentano la quantità di compensazioni disponibili per la vendita ed i crediti cancellati (area verde chiaro in Figura 10) rappresentano i crediti che sono stati acquistati ed utilizzati per compensare le emissioni di CO₂ prodotte dall'acquirente e che non possono più essere rivendute. I crediti emessi in genere superano i crediti cancellati, in parte perché storicamente l'offerta supera la domanda, ma anche a causa del fatto che l'offerta tende ad anticipare la domanda essendo necessari anni prima che un progetto produca dei crediti compensativi che possano essere venduti sul mer-

Figura 10 – Offerta (verde scuro) e domanda (verde chiaro) di crediti compensativi
https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2018/09/VCM-Q1-Report_Full-Version-2.pdf



cato. Nel 2017 l’offerta è stata pari a 63 milioni di tonnellate di CO₂, mentre la domanda ha raggiunto i 43 milioni di tonnellate di CO₂.

Il prezzo per tonnellata di CO₂ nel mercato volontario varia sensibilmente da progetto a progetto, è tendenzialmente inferiore al prezzo registrato nei mercati dei premessi scambiabili non volontari e nel primo trimestre del 2018 si è aggirato attorno ai \$ 3-6. La variabilità del prezzo dipende dalle caratteristiche del progetto realizzato, che può essere più o meno costoso in funzione del luogo in cui è realizzato, del tipo di attività finanziata, dell’entità e tipologia di benefici ancillari alla riduzione delle emissioni di CO₂ e della quantità di crediti scambiati poiché all’aumentare della quantità di emissioni ridotte da un progetto il prezzo di compravendita per tonnellata tende a diminuire.

La maggior parte dei crediti compensativi venduti nel mercato volontario viene acquistata da grandi aziende multinazionali. Fra gli acquirenti finali ci sono però anche organizzazioni non a scopo di lucro, enti pubblici e privati cittadini. L’implementazione di CORSIA potrà dare nuovo slancio al mercato volontario dei crediti compensativi se gli standard che verranno stabiliti dall’ICAO saranno compatibili con quelli attualmente in vigore nel mercato volontario. Un altro elemento importante che l’ICAO dovrà stabilire è il periodo di validità dei crediti compensativi dal momento della realizzazione del progetto finanziato. L’ICAO si è impegnato a pubblicare i criteri che dovranno essere rispettati entro il 2021.

Tabella 2 – Compagnie aeree che offrono la possibilità di acquisto di crediti compensativi ai propri passeggeri

Regions	# of Airline Headquarters	# of Airlines Offering Voluntary Offsetting
Asia	31	9
Europe	34	7
Africa	10	2
Oceania	8	3
Latin America & Caribbean	21	3
North America	14	4
Non-EU Europe	11	1

Fonte: https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2018/09/VCM-Q1-Report_Full-Version-2.pdf

Alcune compagnie aeree hanno già iniziato ad acquistare crediti compensativi nel mercato volontario, anche in ottemperanza della normativa vigente, ad esempio l'EU ETS. Ad oggi, però, solo 29 su 129 delle maggiori compagnie aeree permette ai propri passeggeri di acquistare crediti compensativi nel mercato volontario. 15 compagnie acquistano direttamente crediti compensativi nel mercato volontario senza passare attraverso intermediatori, ma di queste solo 11 offrono la possibilità di acquistare i crediti ai propri passeggeri. Sono soprattutto le compagnie aeree con sede in Oceania, Asia e Nord America ad utilizzare il mercato volontario dei crediti compensativi.

5. CONCLUSIONI

La domanda di trasporto aereo è in continuo aumento e l'impatto sull'ambiente causato dalle emissioni di CO₂ prodotte dal settore aereo, per quanto ancora piccolo rispetto a quello generato da altri settori, inizia a diventare preoccupante. Il costo sociale causato dal cambiamento climatico è una fonte di inefficienza che il decisore pubblico è chiamato a correggere.

La teoria propone al decisore pubblico diverse soluzioni per mitigare il problema del cambiamento climatico, esternalità negativa che risulta particolarmente complessa perché, a differenza delle altre forme di inquinamento atmosferico, produce effetti di portata globale: strumenti istituzionali, la cui implementazione è relativamente semplice e poco costosa ma dall'efficacia limitata, strumenti di tipo "command-and-control", più efficaci dei precedenti ma rigidi e meno efficienti di una terza tipologia di strumenti, quelli "market-based", che hanno il pregio di produrre un doppio beneficio, ambientale e fiscale, ma che per

produrre gli effetti attesi ed evitare fenomeni di free-riding e “carbon leakage”, devono essere applicati globalmente. L’Unione Europea ha scelto la via dei permessi scambiabili limitatamente ai voli effettuati all’interno del continente con il sistema “cap-and-trade” EU ETS, mentre l’ICAO ha deciso di utilizzare lo schema CORSIA basato su crediti compensativi che entrerà in vigore in fase sperimentale nel 2021. Gli obiettivi di CORSIA sono particolarmente ambiziosi perché, a fronte di tassi di crescita di attraversamento dei cieli registrati nel 2018 da parte degli aeromobili pari a 7,4% in Italia, 6,3% in Spagna, 4,5% in Francia, 3,3% in Gran Bretagna e 2,6% in Germania, per citare solo i dati riferiti all’ultimo anno nel contesto europeo²⁵, punta ad un dimezzamento delle emissioni rispetto ai livelli prodotti nel 2005.

Le implicazioni sui costi operativi delle compagnie aeree che, per ottemperare a quanto previsto da CORSIA, potranno da un lato investire in innovazione tecnologica, in efficientamento operativo e nell’uso di biocarburanti, e dall’altro finanziare progetti finalizzati alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra, sono ancora incerti. Per quanto attiene alla capacità del settore di ridurre al suo interno le emissioni, infatti, si prevede da un lato che non sarà possibile scendere oltre un certo livello soglia, e dall’altro che i tempi di implementazione delle innovazioni tecnologiche più efficaci ai fini della riduzione delle emissioni di CO₂, come ad esempio l’uso di velivoli elettrici, saranno molto lunghi, di fatto incompatibili con l’urgenza della risoluzione del problema. La via dell’acquisto di crediti compensativi, del resto, può accorciare i tempi di raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni, ma l’entità dei costi che ne deriveranno per le compagnie aeree, così come la loro capacità di scaricare tali maggiori oneri sugli utenti rimangono un’incognita. Ad oggi solo una piccola percentuale delle maggiori compagnie aeree offre ai propri passeggeri la possibilità di acquistare crediti compensativi, inoltre non esistono dati su come i fondi raccolti dalle compagnie vengano di fatto utilizzati.

²⁵ <http://www.travelquotidiano.com/trasporti/enav-conti-in-salute-grazie-alla-crescita-record-del-traffico-aereo/tqid-360771>

1. European Commission (2017) Annual Analyses related to the EU Air Transport Market 2016, https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2016_eu_air_transport_industry_analyses_report.pdf
2. Aldy, J. E., Barrett, S., & Stavins, R. N. (2003) Thirteen plus one: a comparison of global climate policy architectures, *Climate policy*, 3(4), 373-397.
3. Araghi, Y., Kroesen, M., Molin, E., and B. Van Wee (2016) Revealing heterogeneity in air travelers' responses to passenger-oriented environmental policies: A discrete-choice latent class model, *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(9), 765-772.
4. Baldwin, R., Cave, M., & Lodge, M. (2012) *Understanding regulation: theory, strategy, and practice*. Oxford University Press on Demand.
5. Blasch, J., & M. Farsi (2012): 'Retail demand for voluntary carbon offsets—a choice experiment among Swiss consumers', MPRA Paper No. 41259 <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/41259/>
6. Blasch, J., & M. Farsi (2014): 'Context effects and heterogeneity in voluntary carbon offsetting—a choice experiment in Switzerland', *Journal of Environmental Economics and Policy*, 3(1), 1-24.
7. Choi, A. S. (2015) An experimental study to explore WTP for aviation carbon offsets: the impact of a carbon tax on the voluntary action, *Journal of Environmental Planning and Management*, 58(9), 1617-1634.
8. Engel, K. H., & Saleska, S. R. (2005). Subglobal regulation of the global commons: The case of climate change. *Ecology LQ*, 32, 183.
9. Fankhauser, S., Hepburn, C., & Park, J. (2010). Combining multiple climate policy instruments: how not to do it. *Climate Change Economics*, 1(03), 209-225.
10. Goulder, L. H. (1995). Environmental taxation and the double dividend: a reader's guide. *International tax and public finance*, 2(2), 157-183.
11. Kaplow, L. (2010). Taxes, permits, and climate change, Working paper n. 16268, National Bureau of Economic Research.
12. Kuik, O., & Mulder, M. (2004). Emissions trading and competitiveness: pros and cons of relative and absolute schemes. *Energy Policy*, 32(6), 737-745.
13. McKibbin, W. J., & Wilcoxon, P. J. (2002). The role of economics in climate change policy. *Journal of Economic Perspectives*, 16(2), 107-129.
14. Nocera, S., Tonin, S., & Cavallaro, F. (2015). The economic impact of greenhouse gas abatement through a meta-analysis: Valuation, consequences and implications in terms of transport policy. *Transport Policy*, 37, 31-43.
15. Nordhaus, W. D. (2007). A review of the Stern review on the economics of climate change. *Journal of economic literature*, 45(3), 686-702.
16. Ockwell, D., Whitmarsh, L., & O'Neill, S. (2009). Reorienting climate change communication for effective mitigation: forcing people to be green or fostering grass-roots engagement?. *Science Communication*, 30(3), 305-327.

17. Parry, I. W. (1995). Pollution taxes and revenue recycling. *Journal of Environmental Economics and management*, 29(3), S64-S77.
18. Parry, I. W., Bento, A., M., R. (1999). Revenue recycling and the welfare effects of road pricing. Policy research working paper n. 2253, The World Bank.
19. Pearce, D. (1991). The role of carbon taxes in adjusting to global warming. *The economic journal*, 101(407), 938-948.
20. Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2003). *Natural resource and environmental economics*. Pearson Education.
21. Pizer, W. A. (2002). Combining price and quantity controls to mitigate global climate change. *Journal of public economics*, 85(3), 409-434.
22. Pizer, W. A. (1997). Prices vs. quantities revisited: the case of climate change (No. 1318-2016-103316).
23. Sonnenschein, J., and N. Smedby (2018), Designing air ticket taxes for climate change mitigation: insights from a Swedish valuation study, *Climate Policy*, 1-13.
24. Stavins, R. N. (1997). Policy instruments for climate change: how can national governments address a global problem. Discussion Paper 97-11, Resources for the Future.
25. Stavins, R. N. (2003). Experience with market-based environmental policy instruments. In *Handbook of environmental economics* (Vol. 1, pp. 355-435). Elsevier.
26. Sterner, T. (2007). Fuel taxes: An important instrument for climate policy. *Energy policy*, 35(6), 3194-3202.
27. Tews, K., Busch, P. O., & Jörgens, H. (2003). The diffusion of new environmental policy instruments 1. *European journal of political research*, 42(4), 569-600.
28. Whitmarsh, L., Seyfang, G., & O'Neill, S. (2011). Public engagement with carbon and climate change: to what extent is the public 'carbon capable'?. *Global environmental change*, 21(1), 56-65.

The impact of trade, urbanization and biomass energy consumption on CO₂ emissions: results from a panel of emerging and frontier countries

TULLIO GREGORI, MARIANGELA SCORRANO

1. INTRODUCTION

It is widely agreed that energy plays a vital role in both the production and consumption of goods and services within an economy, actively contributing to countries' growth and development. Fossil fuels remained the most adopted energy sources, reaching 80% of total energy use in 2015. The expansion of energy-consuming activities in the developed and emerging countries, however, is leading to several concerns. First of all, the overexploitation of natural resources and the shortage in fossil energy supply. According to the Peak Oil Theory, there is a growing consensus that in a near future the maximum rate of extraction of petroleum will be reached, after which it is expected to decline forever. Therefore, it is necessary to reduce all the forms of fossil fuels (Li, 2007). Other important issues concern the deterioration and loss of wildlife habitat. Actually, it is well known that environmental degradation and climate change are mainly due to rapidly increasing emissions of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂) and methane. Emerging economies are particularly involved, since they exhibit faster expansion paces than those of advanced ones with a remarkable increase of urbanization too, whose level is now larger than 60% from 37.2% in 1960 (World Bank Development Indicators). Some authors claim urbanization

reduces energy demand by utilizing the public infrastructure (e.g. utilities and public conveyance) efficiently, thus reducing energy consumption and carbon emission (Chen et al., 2008). On the contrary, other researchers indicated that urbanization boosts energy demand, with harmful emissions and environmental degradation. Evidence shows that although they cover less than 2 per cent of the earth's surface, urban areas account for 71 to 76 per cent of the world's carbon dioxide from global final energy use and a significant portion of total greenhouse gas emissions. Congestion, vehicular and industrial emissions in urban areas also inflate the high environmental costs of urban crowding. This is especially true for developing countries where a substantial urban growth is expected (Nagendra et al., 2018).¹ Building infrastructure for fast-growing cities in developing countries is estimated to release 226 gigatonnes of carbon dioxide by 2050, that is more than four times the amount used to build existing developed-world infrastructure (Bai et al., 2018). The link between urbanization and environmental degradation may also work in the opposite direction. Since 90 percent of the world's urban areas are located on coastlines, cities are highly vulnerable to the devastating impacts of climate change, such as rising sea levels and powerful coastal storms.

Growing concern over the sustainability and environmental impact of conventional fuels is arousing interest towards renewable energy sources. The use of clean energy sources is needed to achieve the changes required to address the impacts of global warming. Biomasses may be a suitable form of energy sources and they can be easily adopted in developing nations too. Yet, they still represent only a small portion of the world total, that has been fairly stable around the 10% in the last fifty years. Biomasses can be burned to produce heat and electricity, changed to gas-like fuels such as methane, hydrogen, and carbon monoxide or changed to a liquid fuel. Differently from solar, wind, geothermal, tide and wave, they are not a completely clean, especially when they entail burning. In this case, however, plants and trees that are part of the co-generation process, are able to compensate the carbon dioxide emissions during the burning by absorbing CO₂ and producing oxygen during their growth. Compared to conventional fossil fuels, it is widely acknowledged biomasses have milder environmental and health effects and do not need thousands or millions of years for reproduction as, for instance, oil (Van Loo and Koppejan, 2012). However, some scholars point out process emissions and displacement effects, suggesting biomasses and biofuel are associated with a net increase

¹ According to World bank, their world share of CO₂ emissions rose from 19% in 1960 to 62% in 2014, although much of this steep rise was recorded between the end of the '80s and the beginning of the '90s.

rather than a net decrease in CO₂ emissions (Hill et. al., 2009; Scovronick et al., 2016; DeCicco et al., 2016).

This paper aims at filling this gap providing new fresh evidence about the relationship between biomass consumption and CO₂ emissions in emerging countries, taking into account also the impact of economic growth, urbanization, trade openness and total energy consumption. Actually, we provide a better understanding about the causal relationship between the abovementioned variables which can help in the design and implementation of environmental and energy policies. To accomplish such a task, we analyze a balanced sample of 21 emerging and frontier economies over the period 1974-2014. First, we discuss the presence of common factors and cross-sectional dependency. Then, we address the integrating properties of the variable under investigation and find that the ARDL model is the best approach to address long-run causality. Hence, we determine the cointegrated relationship which shows, as expected, the positive link between environmental degradation, per capita GDP, trade openness, and total energy consumption. On the contrary, biomass energy use and urbanization are negatively associated with CO₂ emissions. Causality analysis reveals that only trade openness and urbanization are exogenous variables, while the others are endogenously determined. Hence, in emerging and frontier countries, urbanization appears to reduce both energy and economic growth as well as pollution, while trade openness plays an opposite role.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 reviews the relevant literature, Section 3 describes the theoretical and the empirical methodology. Section 4 describes the findings while Section 5 concludes and provides policy implications.

2. LITERATURE REVIEW

A growing number of theoretical and empirical studies have been analyzing the link between urbanization level, energy use, carbon emissions, economic growth, renewable and non-renewable energy production or consumption. Empirical evidences from these studies, however, are mixed and remain ambiguous. The variation in results may be attributed to different issues such as variable selection, model specification, country and time periods under investigation as well as the econometric approach.

Many scholars applied the STIRPAT method to investigate the effects of driving forces (population, affluence in terms of per capita consumption or production, and technology) on pollutant emissions, but no consensus has emerged from these studies. Some of them find that there is a positive association between

en the urbanization rate and CO₂ emissions, for example Cole and Neumayer (2004), Poumanyong and Kaneko (2010) for high-income countries, Zhang and Lin (2012) for China, Shafiei and Salim (2014) for OECD countries. In contrast, Fan et al. (2006) show a negative relationship for developed countries over the period 1975 to 2000. The same result is obtained by Martínez-Zarzoso et al. (2007) who analyze the determinants of CO₂ emissions during the period from 1975 to 2003 and reveal that, although the elasticity of emission-urbanization is positive in low-income countries, it is negative in middle upper and high income countries. Similar outcomes are reported in Lv and Xu (2019), who empirically analyze the impact of trade openness and urbanization on CO₂ emissions in 55 middle-income countries over the period 1992-2012. They confirm that urbanization has a negative and significant impact on CO₂ emissions both in the short and long run, implying that urbanization improves environmental quality. In a nutshell, contrasting results on the relationship between urbanization and emissions emerge even in countries with the same levels of development. However, developed and largely urbanized countries seem to be more capable to achieve low carbon intensity by adopting new energy technologies. Hence, the relationship between urbanization and emissions could be better explained by the environmental Kuznets curve in developed countries, implying that higher levels of urbanization contribute to reductions in environmental degradation. This finding confirms the ecological modernization theory, which argues that if the environment and the economy are properly managed through structural changes or modernization, emissions can be curbed. Therefore, as urbanization is a key indicator of modernization (Ehrhardt-Martinez et al., 2002; York et al., 2003a, 2003b), it is expected that at higher levels of urbanization, the environmental impact decreases. Ehrhardt-Martinez (1998), in particular, explains that the urbanization process in its initial stages depends more on resource extraction and then advanced urbanization is accompanied by capital deepening with urban infrastructure as well as larger use of less polluting fuels. In contrast, Zhu et al. (2012) performed a semiparametric panel model to examine the urbanization-carbon emission nexus for a panel of 20 emerging countries and their findings could not confirm the Kuznets hypothesis.

The causal relationship between renewable energy consumption and output has been synthesized into four hypotheses within the literature. First, the growth hypothesis asserts unidirectional causality from energy consumption to economic growth. In such a case, a reduction in renewable energy consumption may have a negative impact on economic growth. Second, the conservation hypothesis establishes the opposite unidirectional causality link that runs from economic growth to renewable energy consumption. Hence, a growing economy might lead to an increase in renewables use and a decrease in renewable energy

consumption without jeopardizing growth. Third, the neutrality hypothesis is characterized by the absence of any causality between energy consumption and economic growth. The former does not play a pivotal role in economic growth and vice versa as growth is driven by other factors. Fourth, the feedback hypothesis emphasizes an interdependent causality between energy consumption and economic growth. Therefore, conservation measures aimed at improving the efficiency in renewable energy consumption will positively impact economic growth but causation runs also in the opposite direction, so changes on economic growth will impact biomass energy consumption too. We can extend such a theory assuming that all relevant variables, such as trade and emissions, are interconnected. The studies analyzing such relationships for emerging economies provide diverging results, finding support for the different hypotheses. Amongst them, few works focus on biomasses as renewable sources. Solarin et al. (2018) explore their impact on CO₂ emissions for 80 developed and developing countries, finding that both biomass and fossil fuel consumption increases environmental degradation, but the magnitude of the former is lower than that of the latter. Moreover, trade openness seems to decrease CO₂ emissions in developed nations and increase them in developing countries, in line with the pollution haven hypothesis. Works in support of the growth hypothesis are those of Payne (2011) for the USA and Bilgili and Ozturk (2015) for the G7 countries. Bildirici (2013) addresses separately some emerging and developing countries. His results sustain the conservation hypothesis (GDP to biomass energy consumption) in Colombia, the growth hypothesis in Bolivia, Brazil, and Chile, and a bi-directional relationship in Guatemala. However, the feedback hypothesis is verified for all countries in the long-run. This author supports the short, long, and strong causality feedback hypothesis in formerly socialist countries (Belarus, Estonia, Georgia, Latvia, Lithuania and Moldova), while in European transition economies (Albania, Bulgaria, Poland and Romania) there is no unidirectional causality from biomass energy consumption to GDP in the short-run only. Analyzing other European countries Bildirici and Ozaksoy (2013) find a unidirectional causality from GDP to biomass energy consumption in Austria and Turkey, the opposite in Hungary and Poland, and bidirectional causality in Spain, Sweden, and France.

At the world level, Piroli et al. (2015) find that biofuels significantly reduce global CO₂ emissions in the medium and long-run whereas, in the short-run, the sign of the relation may reverse. Investigating the causality direction between biomass energy, CO₂ emissions and economic development in USA, Bilgili et al. (2017) find that an increase in biomass energy consumption per capita Granger causes a reduction in CO₂ emissions per capita and augments GDP per capita.

Our work contributes to the existing literature in at least four directions. First, we adopt the Squalli and Wilson (2011) Composite Trade Index (CTS) to

measure countries' trade openness. Differently from traditional indices (trade openness ratio, export propensity, and import penetration), CTS captures the benefits associated with trading relatively intensively with the rest of the world, correctly classifying larger economies as open. Second, we account for urbanization level. Interpreting it as an indicator of modernization, it occurs when economies develop shifting production from agriculture to manufacturing. Third, we shed light on the long-run association amongst the abovementioned variables through Granger-causality tests (Engle and Granger, 1987). Fourth, we employ a robust econometric approach to tackle CSD and we derive long-run heterogeneous panel elasticities via the CCEMG estimator in line with Topcu and Payne (2018) and Shahbaz et al. (2018).

3. METHODOLOGY

In this study we analyze the short and long-run linkages between CO₂ emissions, energy consumption, GDP, combustible renewables and waste, urbanization and trade. The latter is measured by the Composite Trade Share (CTS) developed by Squalli and Wilson (2011), which weights trade openness with the proportion of a country's trade level relative to the average world trade. This index takes into account country's share of trade and correctly classifies integrated but large economies as open ones. Emissions, real GDP, energy consumption, and combustible renewables and waste are in per capita units. Urban population, measured as the percentage of total population, refers to people living in urban areas as defined by national statistical offices. All the variables are transformed in logs so that estimated coefficients can be interpreted as elasticities.

The first step in our empirical analysis consists in checking whether there exists interdependencies among the variables under investigations and unobserved common factors. We test the presence of cross-sectional dependence (CSD) by making use of the Pesaran (2015) test for weak cross sectional dependence (CD-test). The second step is to check stationarity. The existence of CSD in our panel suggests to employ "second-generation" panel unit-root tests such as the cross-section augmented Im-Pesaran-Shin (CIPS) test with common and unit specific lags. Finally, we apply also the test proposed by Herwartz and Siedenburg (2008) to address time variant variance.

Then, we address the long run relationship among the variables under investigation making use of the Autoregressive Distributed Lag model ARDL(P , Q), with the following factor error structure²:

² This technique is applicable when variables are integrated of different order, i.e. I(0) or (1).

$$c_{i,t} = \alpha_i + \sum_{j=1}^P \gamma_{i,j} c_{i,t-j} + \sum_{j=0}^Q \beta_{i,j}^z z_{i,t-j} + u_{i,t} \quad (1)$$

$$u_{i,t} = \zeta_i' f_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$z_{i,t} = a_i^z + \psi_i' f_t + v_{i,t} \quad (3)$$

where α_i are the country-specific fixed effects to control for country factors that are stable over time, $c_{i,t}$ is the log of CO₂ emissions per capita of country i at time t , z is a vector of regressors incorporating the (logs of the) trade openness index variable (o), GDP per capita (g), energy consumption per capita (n), urbanization (b) and combustible renewables and waste consumption per capita (r). The error term $u_{i,t}$ contains unobservables which include m common factors f_t . Vectors ζ_i and ψ_i are factor loadings. Both ε and v are assumed to be uncorrelated idiosyncratic error terms. This model can be usefully rewritten into the well-known Error Correction Model (ECM):

$$\begin{aligned} \Delta c_{i,t} = & \delta_i + \varphi_i (c_{i,t-1} - \theta_i^o o_{i,t} - \theta_i^g g_{i,t} - \theta_i^n n_{i,t} - \theta_i^b b_{i,t} - \theta_i^r r_{i,t}) + \\ & + \sum_{j=1}^{P-1} \lambda_{i,j} \Delta c_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{Q-1} \mu_{i,j}^o \Delta o_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{Q-1} \mu_{i,j}^g \Delta g_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{Q-1} \mu_{i,j}^n \Delta n_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{Q-1} \mu_{i,j}^b \Delta b_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{Q-1} \mu_{i,j}^r \Delta r_{i,t-j} + u_{i,t} \end{aligned} \quad (4)$$

where $\varphi_i = -(1 - \sum_{j=1}^P \gamma_{i,j})$ is the error-correcting speed of adjustment term and parameters of particular interest are the long-run elasticities $-\varphi_i \theta_i^j$, with $j = o, g, n, b, r$. The former is expected to be negative, but larger than -1 if the variables show a return to the long-run equilibrium. The vector $[1 \theta^o \theta^g \theta^n \theta^b \theta^r]$ expresses the cointegrating relationship between CO₂ emissions and all the explanatory variables under scrutiny, whereas $\lambda_{i,j}$ and $\mu_{i,j}$ define the short-run dynamics between the covariates.

Finally, we examine the direction of the causal relationship between the variables under investigation. At this aim, we apply the two-step procedure suggested by Canning and Pedroni (2008), that is a vector error correction model (VECM) version of Granger causality. Firstly, we estimate the long run relationship by using Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) to obtain the error correction term for each country, i.e. $\hat{e}_i = c_i - \hat{\theta}_i^o o_i - \hat{\theta}_i^g g_i - \hat{\theta}_i^n n_i - \hat{\theta}_i^b b_i - \hat{\theta}_i^r r_i$. Since all the variables in this ECM system are stationary, the superconsistency of the estimator of the cointegrating relationship assures the validity of the standard properties when replacing the error correction term with its estimate (Canning and Pedroni, 2008). In any case, in order to allow for the presence of common factors, we include some cross-section averages following Eberhardt and Teal (2013). In the second step we added the one period lagged error term obtained from the first step to the ECM system. Then, we can carry out the usual tests on

the parameter estimates. Since the sample size is small with only 42 years of data across 21 countries, the reliability of individual tests is scarce. Hence, we rely on two panel tests suggested by Canning and Pedroni (2008): the Group Mean (GM) that simply averages countries' statistics; and a Fisher-Type (FT) test that is constructed from the p-values of the t-ratios in each ECM regression³. The null and alternative hypotheses for both the GM and FT tests are the same under the assumption that coefficients are homogenous and equal to zero across nations, while they are different from nil for some non-negligible portions of the countries under the alternative hypothesis.

4. FINDINGS

The analysis focuses on emerging and frontier countries according to the MSCI market classification. Data about CO₂ emissions, measured in metric tons per capita (in short CO₂), energy consumption (EN), measured by energy use in kg of oil equivalent per capita, income (GDP), given by per capita GDP in constant 2010 US\$, biomass use (BIO), measured by combustible renewables and waste use in kg of oil equivalent per capita, urbanization (URB), measured as the urban population over the total, and the trade index components (trade flows and GDP in current US\$), are from the World Bank Development Indicators (retrieved on July 1st, 2019). We consider 21 countries, choosing those with the most complete (available) data for the variables of interest, obtaining a balanced panel. We make use of annual data from 1973 to 2014, thus relying on 42 observations per variable for all the countries under investigation. Table 1 shows summary statistics (before taking logs): the average GDP per capita is less than 5,000 constant US\$, half of which has been traded in international markets, while pollution and energy use amount to 2,478 metric tons and 955 kg of oil equivalent per capita, respectively. Half of the sample is urbanized and, on average, 162 kg of oil equivalent combustible renewables and waste per capita are used. Countries' list with their summary statistics are presented in the Appendix.

Since cross-sectional units in panels may be affected by common shocks, generating inconsistent and biased estimators, the first step in our empirical analysis is to test for CSD. At this aim we employ the Pesaran (2015) test (CD-test), whose null hypothesis is the variable is weakly cross-sectional dependent. Under the null hypothesis the statistic is asymptotically N(0,1) distributed. Results are shown in Table 2 where variables are expressed in logs. The CD-test

³ This lambda-Pearson statistic is equal to $-2 \sum_{i=1}^N \ln p_{\varphi_i}$ where φ_i is the probability associated to the t-test of the error correction term in each country. This statistic is distributed as a χ^2 with $2N$ degrees of freedom under the null of no long-run causation for the panel.

strongly rejects the null hypothesis of weak CSD at the 1% significance level both when variables are in level and in first differences.

Our second step is to check for stationarity. Given the presence of CSD we adopt second generation panel unit root tests. We first perform the standard cross-sectional augmented Ims-Pesaran-Shin (CIPS) test (Pesaran, 2007). Here the statistic is constructed from the results of panel-member-specific (A)DF regressions also including cross-section averages of the dependent and independent variables (with the lagged differences to account for serial correlation). Outcomes with and without adding a trend, are summarized in Table 3.

Table 1 – Summary statistics

VARIABLE	OBS	MEAN	STD. DEV.	MIN	MAX
CO ₂	882	2.478	2.257	0.192	9.871
GDP	882	4808.9	4884.4	253.7	30055
EN	882	955.1	659.0	206.7	2967.5
BIO	882	162.18	96.5	17.10	592.1
URB	882	0.517	0.216	0.118	0.916
CTS	882	0.597	1.093	0.022	8.523

Table 2 – Cross sectional dependence

	LEVELS		DIFFERENCES	
	CD-TEST	P-VALUE	CD-TEST	P-VALUE
CO ₂	27.326	0.00	13.883	0.00
BIO	93.702	0.00	3.435	0.00
GDP	93.816	0.00	34.751	0.00
EN	93.843	0.00	17.491	0.00
CTS	61.440	0.00	23.559	0.00
URB	92.779	0.00	58.810	0.00

Table 3 – Pesaran (2007) Panel Unit Root test (CIPS) with common lags

VARIABLE	LAGS	LEVELS				DIFFERENCES			
		WITHOUT TREND		WITH TREND		WITHOUT TREND		WITH TREND	
		ZT-BAR	P-VALUE	ZT-BAR	P-VALUE	ZT-BAR	P-VALUE	ZT-BAR	P-VALUE
CO ₂	0	0.335	0.63	1.753	0.96	-18.792	0.00	-18.394	0.00
	1	0.492	0.69	2.602	1.00	-10.605	0.00	-9.793	0.00
	2	0.453	0.68	2.566	1.00	-5.503	0.00	-4.392	0.00
	3	-0.272	0.39	1.593	0.94	-4.414	0.00	-3.724	0.00
BIO	0	2.042	0.98	2.939	1.00	-15.447	0.00	-14.696	0.00
	1	1.583	0.94	2.550	1.00	-10.653	0.00	-9.694	0.00
	2	3.036	1.00	4.644	1.00	-5.074	0.00	-3.664	0.00
	3	3.573	1.00	5.413	1.00	-1.876	0.03	-0.118	0.45
GDP	0	1.780	0.96	1.465	0.93	-14.575	0.00	-13.490	0.00
	1	-0.382	0.35	-0.612	0.27	-9.485	0.00	-8.401	0.00
	2	-0.303	0.38	-0.817	0.21	-7.012	0.00	-5.456	0.00
	3	0.200	0.58	0.287	0.61	-5.813	0.00	-4.862	0.00
EN	0	1.512	0.94	4.795	1.00	-17.090	0.00	-17.288	0.00
	1	1.983	0.98	5.265	1.00	-9.017	0.00	-8.335	0.00
	2	1.900	0.97	4.940	1.00	-4.254	0.00	-3.342	0.00
	3	1.852	0.97	4.369	1.00	-2.745	0.00	-2.410	0.01
CTS	0	-0.076	0.47	2.800	1.00	-17.405	0.00	-16.304	0.00
	1	-0.188	0.43	2.851	1.00	-11.316	0.00	-9.937	0.00
	2	0.855	0.80	3.968	1.00	-6.833	0.00	-5.341	0.00
	3	0.381	0.65	4.158	1.00	-3.842	0.00	-2.536	0.01
URB	0	1.058	0.86	0.210	0.58	0.909	0.82	3.288	1.00
	1	-4.002	0.00	-7.120	0.00	-2.225	0.01	0.231	0.59
	2	-0.470	0.32	-4.512	0.00	-2.956	0.00	0.026	0.51
	3	-0.863	0.19	-3.278	0.00	-2.722	0.00	-0.158	0.44

All the variables are I(1) but urbanization that appears to be I(0) in the specification without a trend exception made for the first lag. When we add a trend results are puzzling. However, this CIPS test assumes the very same number of lags in all the countries' whereas heterogeneity may produce deceiving results. Therefore, we set individual dynamics specifications as suggested by Burdisso and Sangiacomo (2016). They propose two criteria for individual lag selection: a Wald test of composite linear hypothesis about the parameters of the model and a Portmanteau test for white noise. In particular, the number of lags to include in each individual regression is obtained with an iterative process from 0 to a fixed maximum number, based on the test's significance level set to select dynamics – reject H0 (at 5% or below) in the Wald test or do not reject (at 95% or above) H0 in the Portmanteau – or the maximum number of lags, whichever comes first. Results for this CIPS test are presented in Table 4.

Results confirm variable under scrutiny but urbanization are I(1). The only exception, again, regards the urbanization that appears to be I(0).

Table 4 – Panel Unit Root Test (CIPS) with individual lags

		WITHOUT TREND		WITH TREND	
		LEVEL	DIFFERENCES	LEVEL	DIFFERENCES
CO ₂	Wald	-1.745	-5.625***	-2.057	-5.872***
	Portmanteau	-1.713	-5.625***	-1.935	-5.872***
BIO	Wald	-1.426	-4.789***	-1.733	-4.951***
	Portmanteau	-1.497	-4.939***	-1.937	-5.162***
GDP	Wald	-1.568	-4.842***	-2.313	-5.014***
	Portmanteau	-1.511	-4.760***	-2.141	-4.930***
EN	Wald	-1.533	-5.275***	-1.419	-5.660***
	Portmanteau	-1.433	-5.275***	-1.371	-5.660***
CTS	Wald	-1.813	-5.340***	-1.839	-5.419***
	Portmanteau	-1.854	-5.256***	-1.806	-5.387***
URB	Wald	-2.350***	-2.020	-3.505***	-2.106
	Portmanteau	-2.194**	-1.667	-3.414***	-1.795

Critical values without trend at 10%, 5%, and 1% are -2.040, -2.110 and -2.230, respectively. Critical values with trend at 10%, 5%, and 1% are -2.540, -2.610 and -2.730, respectively.

Table 5 – Herwartz and Siedenburg tests

	LEVELS		FIRST DIFFERENCE	
	HB-TEST	P-VALUE	HB-TEST	P-VALUE
CO ₂	2.468	0.99	-4.516	0.00
BIO	0.726	0.77	-3.330	0.00
GDP	2.125	0.98	-3.790	0.00
EN	3.941	1.00	-3.563	0.00
CTS	0.795	0.79	-2.813	0.00
URB	-1.244	0.11	-2.218	0.01

To get a better understanding we also perform the test proposed by Herwartz and Siedenburg (2008) which allows for time variant variance and is also robust to both heteroschedasticity and CSD (Herwartz et al., 2018). Outcomes in Table 5 confirm that all time-series are non-stationary at levels, and stationary at their first order differentials, so they are I(1).

Hence, we can safely use the ARDL model using the CCEMG estimator. Results are reported in Table 6.

Since all variables are expressed in natural logarithms, the estimated long-run coefficients can be interpreted as long-run elasticities. Results in Table 6 show that GDP, energy use and trade openness all have a positive effect on environmental degradation, even if with a diverse magnitude and at different levels of statistical significance. An interesting aspect that emerges from Table 6 is the opposite impact on carbon dioxide emissions by the overall level of energy consumption, on the one hand, and the combustible renewables and wastes, on the other. More specifically, a larger energy use will degrade the environment with a more than proportional rise in CO₂ emissions. On the contrary, the use of biomass decreases pollution⁴, but with a lower impact in absolute values. Hence, we can suppose that biomass and similar renewable energy consumption may curb the negative impact on environment generated by the overall energy use. If we observe the urbanization long-run estimate, we note that the impact on CO₂ emissions is negative and statistically significant at 5%. Higher levels of urbanization improve environmental quality. Advanced urbanization, in fact, is likely

⁴ This outcome is similar to that of Dogan and Inglesi-Lotz (2017), who investigate the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide emissions. They find confirmation of the Environmental Kuznets Curve hypothesis and that biomass energy consumption decreases the level of CO₂ emissions.

to be accompanied by largely complete urban infrastructure as well as increased use of less polluting fuels.

Finally, we investigate the direction of causation. Results are shown in Table 7.

Table 6 – CCEMG estimates

D.CO ₂	Coef.	Std. Err.	z	P>z
MEAN GROUP ESTIMATES:				
SHORT RUN ESTIMATES:				
D.BIO	-2.120	2.024	-1.05	0.30
D.GDP	0.103	0.081	1.27	0.20
D.EN	0.125	0.128	0.98	0.33
D.CTS	-0.016	0.013	-1.21	0.23
D.URB	3.763	2.758	1.36	0.17
_cons	-4.253	0.810	-5.25	0.00
LONG RUN ESTIMATES:				
ec	-0.731	0.068	-10.80	0.00
BIO	-0.624	0.346	-1.80	0.07
GDP	0.181	0.101	1.80	0.07
EN	1.227	0.197	6.22	0.00
CTS	0.117	0.059	1.98	0.05
URB	-0.642	0.274	-2.34	0.02
CD test	0.282		CD prob	0.78

Table 7 – Canning and Pedroni tests for direction of causation

	<i>GM</i>	<i>(p)</i>	<i>Fisher</i>	<i>(p)</i>	<i>Mean</i>	<i>Pr>z</i>
CO ₂	0.124	0.90	116.987	0.00	-0.023	0.07
BIO	0.145	0.89	110.955	0.00	-0.016	0.58
GDP	0.349	0.73	90.672	0.00	-0.005	0.76
EN	0.907	0.36	85.076	0.00	-0.005	0.56
CTS	0.405	0.69	48.592	0.22	0.135	0.14
URB	-0.393	0.69	45.961	0.31	0.000	0.89

The Group Mean *t*-tests reveal no causality link in all the specifications, whereas the Fisher-based statistics point out causality runs from the other variables to CO₂ emissions, biomass and waste, GDP and energy use. Eberhardt and Teal (2013) underline the difference in the two tests. The GM is a two-sided test that can take positive or negative values under the alternative hypothesis. Therefore, it investigates if coefficients are on average zero, while the FT is a one-sided test that can only take positive values and checks if coefficients are pervasively zero. Summing up results in Table 7 we can conclude that only trade openness and urbanizations are exogenous variables, whereas CO₂ emissions, GDP per capita, energy consumption, and biomass use are jointly determined. Hence, an increase in urbanization triggers a reduction in economic growth, pollution as well as energy but biomass usage, whilst trade openness plays an opposite role in emerging and frontier markets.

5. CONCLUSIONS

This study investigates the effect that biomass and waste, trade openness, GDP, urbanization level, and energy consumption exert on CO₂ emissions in a balanced panel of 21 emerging and frontier countries over the period 1973-2014. These countries registered a GDP share in Purchasing Power Parity (PPP) that rose from 37% in 1980 to 59% in 2017 and now account for more than half of world GDP in PPP. At the same time, the gradual transition of the global population towards urban living has resulted in remarkable levels of urbanization. Their energy demand increased, mainly satisfied through fossil sources, but at the expenses of environmental degradation. Emerging countries' share on total CO₂ world emissions, in fact, more than tripled between 1960 and 2014. The growing concern over the sustainability and environmental impacts of conventional fuels, that are the main reasons for the global climate targets of the Paris Agreement, is making increasingly necessary for these countries to move towards a larger employment of renewables or at least less polluting energy sources. Modern biomass energy might be an interesting alternative because it is renewable, abundant and can be produced everywhere.

Therefore, it is interesting and useful from a policy perspective to address the long-run links between CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy production or consumption, economic growth, urbanization, trade openness and energy consumption. We accomplished such a task by adopting an ARDL model which can shed light on long-run Granger causality between the variables under investigation. Our results show that there exists a cointegrated relationship between environmental degradation, per capita GDP, trade openness, and total

energy consumption. CO₂ emissions are, as expected, positively associated with energy consumption, economic growth as well as trade openness. Therefore, the transition towards a green economy could be a desirable way to mitigate the environmental pressure resulting from the economic development. On the contrary, biomass energy use and urbanization are negatively associated with CO₂ emissions. Causality analysis reveals that only trade openness and urbanization are exogenous variables, while the others are endogenously determined. Hence, in emerging and frontier countries, urbanization appears to reduce both energy and economic growth as well as pollution, while trade openness plays an opposite role.

APPENDIX

COUNTRY	CO ₂		GDP		EN		BIO		URB		CTS	
	MEAN	STD. DEV.	MEAN	STD. DEV.	MEAN	STD. DEV.	MEAN	STD. DEV.	MEAN	STD. DEV.	MEAN	STD. DEV.
Argentina	3.866	0.404	8030.430	1276.438	1587.224	193.474	69.901	10.912	0.870	0.035	0.136	0.080
Brazil	1.680	0.331	8720.253	1439.614	1048.241	176.507	338.716	40.261	0.750	0.083	0.351	0.144
Chile	3.047	0.986	8077.519	3398.894	1295.793	472.639	256.341	100.967	0.843	0.033	0.289	0.146
China	3.133	1.964	1744.205	1691.292	1011.132	527.084	170.423	10.755	0.317	0.117	2.590	3.076
Colombia	1.570	0.135	4665.287	1102.974	663.293	43.437	127.048	39.941	0.686	0.056	0.124	0.046
Egypt, Arab Rep.	1.597	0.555	1707.611	541.250	574.797	200.746	18.483	0.558	0.433	0.004	0.243	0.083
Greece	6.891	1.470	21519.570	3949.361	2074.653	471.535	76.187	25.273	0.720	0.030	0.341	0.112
India	0.846	0.378	721.903	370.105	391.750	103.043	152.534	10.521	0.264	0.033	0.593	0.729
Indonesia	1.132	0.541	1994.134	776.492	591.242	196.057	220.696	14.519	0.349	0.112	0.641	0.208
Kenya	0.282	0.055	883.467	63.688	452.020	14.601	350.375	4.263	0.184	0.036	0.061	0.017
Malaysia	4.458	2.235	5786.391	2430.125	1659.957	779.069	93.600	21.749	0.547	0.119	2.552	1.600
Mexico	3.782	0.449	7805.231	1052.956	1408.650	187.680	89.478	11.358	0.718	0.051	1.102	0.775
Morocco	1.120	0.378	1907.052	588.207	361.733	108.159	44.180	8.607	0.492	0.069	0.178	0.057
Pakistan	0.657	0.215	778.781	195.441	410.812	73.960	175.335	2.794	0.317	0.035	0.095	0.020
Peru	1.280	0.293	3736.057	805.564	546.177	97.389	134.544	55.021	0.701	0.053	0.103	0.053
Philippines	0.801	0.125	1685.064	282.658	457.989	23.817	142.829	51.339	0.441	0.046	0.485	0.295
South Africa	8.518	0.842	6299.546	617.374	2455.282	230.695	258.642	27.145	0.544	0.054	0.557	0.136
Sri Lanka	0.411	0.202	1614.017	786.455	375.201	78.205	224.040	14.999	0.186	0.004	0.088	0.023
Thailand	2.281	1.374	2998.428	1458.086	986.137	518.365	250.428	45.898	0.323	0.071	1.381	1.032
Tunisia	1.813	0.466	2706.974	842.188	660.978	180.595	89.166	13.799	0.586	0.067	0.177	0.045
Turkey	2.868	0.892	7605.539	2378.523	1045.070	286.810	122.801	43.913	0.585	0.105	0.445	0.321

REFERENCES

- Bai, X., Dawson, R. J., Ürge-Vorsatz, D., Delgado, G. C., Barau, A. S., Dhakal, S., ... & Schultz, S. (2018). Six research priorities for cities and climate change.
- Bildirici, M. E. (2013). "Economic growth and biomass energy." *Biomass and bioenergy*, 50, 19-24.
- Bildirici, M. E., & Özaksoy, F. (2013). "The relationship between economic growth and biomass energy consumption in some European countries." *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(2), 023141.
- Bilgili, F., & Ozturk, I. (2015). "Biomass energy and economic growth nexus in G7 countries: Evidence from dynamic panel data." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 132-138.
- Bilgili, F., Koçak, E., Bulut, Ü., & Kuşkaya, S. (2017). "Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 830-845.
- Burdisso, T., & Sangiácomo, M. (2016). Panel time series: Review of the methodological evolution. *The Stata Journal*, 16(2), 424-442.
- Canning, D., & Pedroni, P. (2008). Infrastructure, long-run economic growth and causality tests for cointegrated panels. *The Manchester School*, 76(5), 504-527.
- Chen, H., Jia, B., & Lau, S. S. Y. (2008). Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat international*, 32(1), 28-40.
- Cole, M. A., & Neumayer, E. (2004). Examining the impact of demographic factors on air pollution. *Population and Environment*, 26(1), 5-21.
- DeCicco, J. M., Liu, D. Y., Heo, J., Krishnan, R., Kurthen, A., & Wang, L. (2016). "Carbon balance effects of US biofuel production and use." *Climatic Change*, 138(3-4), 667-680.
- Dogan, E., & Inglesi-Lotz, R. (2017). "Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO₂) emissions: Empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries.", *Energy*, 138(1), 721-727.
- Eberhardt, M., & Teal, F. (2013). "No mangoes in the tundra: Spatial heterogeneity in agricultural productivity analysis." *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 75(6), 914-939.
- Ehrhardt-Martinez, K. (1998). Social determinants of deforestation in developing countries: A cross-national study. *Social Forces*, 77(2), 567-586.
- Ehrhardt-Martinez, K., Crenshaw, E. M., & Jenkins, J. C. (2002). Deforestation and the environmental Kuznets curve: A cross-national investigation of intervening mechanisms. *Social Science Quarterly*, 83(1), 226-243.
- Engle, R. F., & Granger, C. W. (1987). "Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing." *Econometrica*, 55(2), 251-276.
- Fan, Y., Liu, L. C., Wu, G., & Wei, Y. M. (2006). Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, 26(4), 377-395.

- Herwartz, H., & Siedenburg, F. (2008). "Homogenous panel unit root tests under cross sectional dependence: Finite sample modifications and the wild bootstrap." *Computational Statistics and Data Analysis*, 53, 137-150.
- Herwartz, H., Maxand, S., Raters, F. H., & Walle, Y. M. (2018). "Panel unit-root tests for heteroskedastic panels." *Stata Journal*, 18(1), 184-196.
- Hill, J., Polasky, S., Nelson, E., Tilman, D., Huo, H., Ludwig, L., ... & Bonta, D. (2009). "Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 2077-2082.
- Li, M. (2007). "Peak oil, the rise of China and India, and the global energy crisis." *Journal of Contemporary Asia*, 37(4), 449-471.
- Lv, Z., & Xu, T. (2019). Trade openness, urbanization and CO₂ emissions: Dynamic panel data analysis of middle-income countries. *The Journal of International Trade & Economic Development*, 28(3), 317-330.
- Martínez-Zarzoso, I., Bengochea-Morancho, A., & Morales-Lage, R. (2007). The impact of population on CO₂ emissions: evidence from European countries. *Environmental and Resource Economics*, 38(4), 497-512.
- Nagendra, H., Bai, X., Brondizio, E. S., & Lwasa, S. (2018). The urban south and the predicament of global sustainability. *Nature Sustainability*, 1(7), 341-349.
- Payne, J. E. (2011). "On biomass energy consumption and real output in the US." *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 6(1), 47-52.
- Pesaran, M. H. (2007). "A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence." *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312.
- Pesaran, M. H. (2015). Testing weak cross-sectional dependence in large panels. *Econometric Reviews*, 34(6-10), 1089-1117.
- Piroli, G., Rajcaniova, M., & Ciaian, P. (2015). "From a rise in B to a fall in C? SVAR analysis of environmental impact of biofuels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 921-930.
- Poumanyong, P., & Kaneko, S. (2010). Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. *Ecological Economics*, 70(2), 434-444.
- Scovronick, N., França, D., Alonso, M., Almeida, C., Longo, K., Freitas, S., ... & Wilkinson, P. (2016). "Air quality and health impacts of future ethanol production and use in São Paulo State, Brazil". *International Journal of environmental research and public health*, 13(7), 695.
- Shafiei, S., & Salim, R. A. (2014). Non-renewable and renewable energy consumption and CO₂ emissions in OECD countries: A comparative analysis. *Energy Policy*, 66, 547-556.
- Shahbaz, M., Shahzad, S. J. H., Mahalik, M. K., & Hammoudeh, S. (2018). "Does Globalisation Worsen Environmental Quality in Developed Economies?" *Environmental Modeling & Assessment*, 23(2), 141-156.
- Solarin, S. A., Al-Mulali, U., Gan, G. G. G., & Shahbaz, M. (2018). "The impact of biomass energy consumption on pollution: evidence from 80 developed and developing countries." *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17.
- Squalli, J., & Wilson, K. (2011). "A new measure of trade openness." *The World Economy*, 34(10), 1745-1770.
- Topcu, M., & Payne, J. E. (2018). "Further evidence on the trade-energy consumption nexus in OECD countries." *Energy Policy*, 117, 160-165.
- Van Loo, S., & Koppejan, J. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan.
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003a). Footprints on the earth: The environmental consequences of modernity. *American sociological review*, 68(2), 279-300.
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003b). STIRPAT, IPAT and ImpACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological economics*, 46(3), 351-365.
- Zhang, C., & Lin, Y. (2012). Panel estimation for urbanization, energy consumption and CO₂ emissions: A regional analysis in China. *Energy policy*, 49, 488-498.
- Zhu, H. M., You, W. H., & Zeng, Z. F. (2012). Urbanization and CO₂ emissions: A semi-parametric panel data analysis. *Economics Letters*, 117(3), 848-850.

The academic literature on electric vehicles in the social sciences

SAIFUL HASAN, THOR-ERIK SANDBERG HANSSEN,
TERJE ANDREAS MATHISEN

1. INTRODUCTION

Growing populations, economic development, and urbanization are factors contributing to increasing demand for transportation services, particularly on roads. This demand triggers severe environmental and energy challenges, particularly for countries with large economies. Leading energy consuming countries are increasingly concerned about establishing energy security and reducing pollution from transportation (Travesset-Baro et al., 2015; Zhao and Heywood, 2017). Countries are considering encouraging the mass adoption of electric vehicles (EVs) as a strategy to meet these objectives. The goal is to mitigate some of the energy and environmental challenges to a greater extent (Degirmenci and Breitner, 2017; Mersky et al., 2016).

It is important to note, however, that any policy implementation to make EVs more attractive should be evidence-based. Policymakers, therefore, need to be informed about the current evidence base related to EVs, prior to making any decision. Two recent studies have reviewed the literature on EVs (Liao et al., 2017; Rezvani et al., 2015). These reviews include studies related to EV adoption published after 2005 (Liao et al., 2017) and 2007 (Rezvani et al., 2015), respectively.

Such overviews can be provided by systematic literature reviews (SLR), which involves searching for, selecting, critically appraising and summarizing the results of research (Cook et al., 1997). The overall objective of our study is to expand the current body of knowledge on EVs by conducting an SLR of EV-articles published within the field of social sciences from 1995 to 2018. Consequently, this study includes a broader set of EV topics and of articles published during a longer time period than those covered in the two abovementioned studies.

More specifically, the aim of this book chapter is twofold. First, we review the literature on electric vehicles to identify (i) how the frequency of published articles in the field has evolved, (ii) their focus and (iii) the researchers, journals, research institutions, and countries being most active. The review will focus on the social sciences to highlight the effects on society from the evolution of research on electric vehicles. Second, we identify the most influential works on electric vehicles and rank these based on how often they were cited. It has been argued that the most cited articles are those with the greatest impact on that particular field (Ibrahim et al., 2012).

The findings are useful to both policymakers and the research community in at least four ways. First, it illuminates which research topics related to EV that is most frequently covered by existing literature. Second, under-researched topics can be identified. Third, we can shed light on how the research-field is developing. Fourth, the most influential articles on EV, to which both researchers and policymakers ought to familiarise themselves with, are identified.

The remainder of this book chapter is structured as follows: in Section 2, we describe the methodology used and the data source applied, Section 3 accounts for the historical development of academic research regarding electric vehicles, the important works within this field of research are presented in Section 4, and conclusions and implications are presented in Section 5.

2. METHODOLOGY

The data presented in this book chapter were gathered from Scopus, the world's largest abstract and citation database of peer-reviewed literature (www.scopus.com). The database was searched for entries containing the term "electric vehicle". To be included in the search result, these two words had to appear either in the title, the abstract or in keywords defined either by the author or by Scopus. The search was further restricted to journal articles written in English and within the social sciences between 1995 and 2018. These criteria resulted in 1312 articles. The historical entries in Scopus could change somewhat over

time because of updates in underlying sources. The data set for this study was extracted in August 2019.

The term “electric vehicle” or “EV” refers to a type of alternative fuel vehicles in which partial or entire propulsion power is generated from electricity stored in electric battery packs (Rezvani et al., 2015; Egbue and Long, 2012). The EV categories usually include vehicles with different technologies such as battery electric vehicles (BEV), plug-in electric vehicles (PHEV), and hybrid electric vehicles (HEV). Despite having a small battery pack, it is argued that HEV is mainly a fuel-efficient conventional vehicle as all of its propulsion energy generates from the liquid fuel (Schuitema, 2013). PHEVs are equipped with both internal combustion engine (ICE) and electric battery but mostly run on battery which can be recharged from the external electric supply as well as via ICE and regenerative braking (Egbue and Long, 2012). BEVs are recognized as pure electric vehicles or all-electric vehicles, where battery stored energy powers the electric drivetrain (Campanari et al., 2009).

Social science is, in its broadest sense, a discipline that studies social interaction, society or culture and is composed of sociology and social psychology, linguistics, cultural anthropology, political science, economics, aspects of geography, and even business and management studies (Baker, 1964; Theodorson and Theodorson, 1969).

Despite its extensive range of journals related to the social sciences, the Scopus database does not present a complete picture of the body of literature. Hence, the selection of articles would be different if based on other sources. The data set was compared to the data set delivered by ISI Web of Knowledge provided by Thomson Reuters when using a similar procedure. ISI included fewer journals, and there were fewer observations. However, the majority of the articles found in ISI were present in Scopus, which indicates that the most important works are present in the data set applied in this chapter. The use of a more extensive search engine, such as Google Scholar, would include many observations that are not peer-reviewed and are perhaps of lower scientific quality (Aguillo, 2012). The different scope of the databases also influences the number of reported citations.

A disadvantage of Scopus relates to older articles. Reportedly, the database is not complete for the years prior to the mid-1990s. Consequently, this study excludes data predating 1995. Nevertheless, one should be aware that figures regarding the earliest period are somewhat uncertain and must be treated with caution. The idea of electric vehicles is not new, electric cars were introduced more than 100 years ago. But the growing interest of EVs has been experienced at the beginning of the current century (Daziano and Chiew, 2012; Matulka, 2014). Hence, the relevant part of the rapidly expanding body of literature over the last 24 years is covered at a satisfactory level in this database.

A particular advantage of such a structured approach to a literature review as the one applied in this study is the high degree of reliability due to the ability to replicate the results. Consequently, it is important that SLR studies contain a methodology section describing in detail how the data extraction was conducted (Denyer and Neely, 2004), thus allowing readers to assess the appropriateness of the procedure used and, as such, the degree to which the conclusions drawn are trustworthy. SLRs are conducted to provide evidence-based policy recommendations in various policy fields. They are, for example, used to review the evidence on the effects of physical activity on health and behavior among school-age youth (Strong et al., 2005) and cloud computing (Jula et al., 2014). SLRs are also done on transportation topics, including air transport (Ginieis et al., 2012) and intermodal freight transport (Mathisen and Hanssen, 2012).

3. ACADEMIC RESEARCH ON ELECTRIC VEHICLES

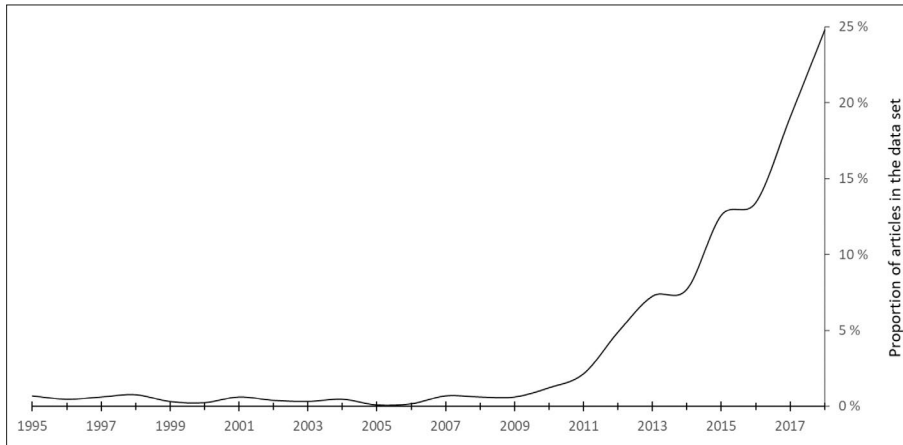
This chapter presents our findings with regard to the historical development of academic research on electric vehicles and identifies the most productive researchers on the topic.

3.1 *Publishing frequency*

The search procedure presented in Section 2 identified 1312 articles. The distribution over time is illustrated in Fig. 1, in which the horizontal and vertical lines represent publication year and percentage of publications, respectively. It is evident from Fig. 1 that the majority of articles were published at the end of the time period. In fact, more than half (57%) of the articles were published during the last three years of the period, from 2016 to 2018. In the years prior to 2010, the annual publishing frequency was 10 papers or fewer. Fig. 1 illustrates how the field is clearly emerging.

The annual number of publications in Fig. 1 was 36 times higher in 2018 relative to 1995. However, during the same period the overall number of publications within the social sciences, as registered by Scopus, grew by 188%. This indicates that there has not only been an absolute increase in the research focus on electric vehicles during the period investigated but also that the focus on electric vehicles has grown relative to other research areas within the social sciences.

Figure 1 – Proportion of articles in the data set published each year



3.2 Publication channels

The articles addressing electric vehicles were published in 162 different scientific journals. These journals cover a wide range of research topics including transportation, sustainability, policy, and statistics. Of the 162 journals, approximately half were represented only once in the data set. The journals most frequently publishing articles on this topic can broadly be categorized as being within the tradition of transport economics. The 10 journals with most EV articles are presented in Table 1. Because of the rapidly increasing publishing frequency, we present the last four years separately.

Clearly, the most relevant journal for research on electric vehicles is *Transportation Research Part D* with 210 articles. This is not surprising as the journal publishes research on the environmental impacts of transportation, policy responses to those impacts, and their implications for the design, planning, and management of transportation systems. Five journals published 80 or more articles on this topic. In addition to *Transportation Research Part D*, *Parts A* and *C* in this series stand out as having the most publications in the first part of the studied time period, from 1995 to 2014. By contrast, the publications during the last five years were more equally distributed among the 10 journals in Table 1. Finally, it is worth noting that six out of the ten journals listed in Table 1 published more articles on EVs in 2018 alone than they did in the 20-year period from 1995 to 2014.

Table 1 – The journals most frequently publishing articles on electric vehicles between 1995 and 2018

	JOURNALS	1995-2014	2015	2016	2017	2018	TOTAL
1	Transportation Research Part D Transport and Environment	69	21	21	32	67	210
2	IEEE Transactions on Transportation Electrification	0	23	20	45	21	109
3	Sustainability Switzerland	6	8	11	18	48	91
4	Transportation Research Part A Policy and Practice	32	14	10	18	16	90
5	Transportation Research Part C Emerging Technologies	22	11	18	14	18	83
6	International Journal of Sustainable Transportation	6	3	11	13	10	43
7	Transport Policy	11	2	10	6	6	35
8	Transportation Research Part B Methodological	6	1	6	14	7	34
9	Sustainable Cities and Society	2	1	3	4	22	32
10	Iet Intelligent Transport Systems	8	4	5	2	9	28
	Total (for top 10 Journals)	162	88	115	166	224	755

3.3 Topics treated

Throughout the years, a number of topics related to electric vehicles have been addressed. Each article contained a number of keywords that were part of broader categories. Based on the keywords, Table 2 presents the categories that were most frequently used to describe the articles. Three example keywords are provided to better clarify the content of each category. Because each article included several keywords, the total number of keywords exceeds the number of articles.

The focus on different topics has changed over the studied time period. Whereas for example, “Technology and innovation” accounted for a relatively higher proportion of the early articles, “Policy” appears to be an increasingly important topic of interest for current researchers. “Models and analytical approach” and “Economic theory” remained stable over the last 24 years. “Environment” was the most addressed topic throughout the entire period, peaking at

Table 2 – The most frequently addressed topics within articles addressing EVs

TOPIC/CATEGORY	# KEYWORDS	EXAMPLE KEYWORDS
Environment	1599	Greenhouse gases, Energy use, Sustainability
Types of EV	1461	Hybrid, Battery electric, Fuel cells
Policy	1102	Regulation, Planning, Infrastructure
Models and analytical approach	762	Optimization, Numerical model, Surveys
Economic theory	625	Costs, Competition, Cost-Benefit Analysis
Technology and innovation	392	Technology adoption, Innovation, Traffic control
Regions	371	United States, China, Germany
Energy sources	337	Electric utilities, Alternative energy, Smart grid
Behavior	285	Consumption, Travel behavior, Range anxiety
Business and management	238	Commerce, Sales, Investment

approximately 2002-2006 and accounting for more than 50% of the keywords. Within this category, the studies most frequently addressed “Energy use”, followed by “Greenhouse gases and other emissions”. However, focus on each of the topics varied over the studied time period.

The second most frequent topic given in Table 2 relates to the “Type of EV”. “Hybrid” vehicles are addressed most frequently and account for approximately 21% of the keywords in this category, followed by “battery electric” with 12%. “Internal combustion engines” are mentioned about equally often as “Hydrogen/ Fuel cells”. The third most-used category is “Policy” and includes “Regulation”, “Planning” and “Mobility”. Among the remaining categories, we address “Regions” separately in Section 3.4. Evidently, there seems to have been less focus on “Behaviour” and “Business and management”. This can be somewhat of a concern if the aim is to increase EV adoption.

3.4 Countries

The number of countries from which researchers have addressed EVs has grown considerably during the past 24-year period (see Table 3). In 1995, researchers from only 2 countries (United States and Sweden) addressed the topic. By 2018, this number had grown to 56. It is evident that the major focus of attention is

from researchers in Europe, North America, and Asia; researchers from Africa and South America appear to have less frequent publications within this field. Such country distribution can be argued to provide valuable information for researchers to find where colleagues are located and possibly to help to establish research collaboration (Xie, 2015).

Furthermore, according to Table 3, the majority of the top 10 countries are members of the Electric Vehicle Initiative (EVI). The EVI is a multi-government policy forum established in 2009 under the Clean Energy Ministerial, with a motivation to accelerate the deployment of EVs worldwide (IEA, 2016). The EVI aims at global deployment of 20 million electric cars by 2020 (Clean Energy Ministerial, 2016). According to IEA (2016), the EVI includes 16 member governments (these countries are Canada, China, France, Germany, India, Italy, Japan, Korea, the Netherlands, Norway, Portugal, South Africa, Spain, Sweden, the United Kingdom, and the United States, of which China and the United States are co-chairs of the initiative) representing the majority of the global EV stock and the largest and most rapidly growing EV markets worldwide.

Table 3 – The ten countries with the most articles on electric vehicles

	COUNTRIES	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2018	TOTAL	PROPORTION OF DATA SET
1	United States	16	10	15	102	254	397	23 %
2	China	0	0	2	27	159	188	11 %
3	Germany	0	1	0	24	102	127	7 %
4	United Kingdom	2	3	0	32	75	112	7 %
5	Canada	1	1	0	13	65	80	5 %
6	Netherlands	2	3	0	21	33	59	3 %
7	Australia	0	0	0	15	42	57	3 %
8	Italy	0	0	2	6	41	49	3 %
9	Sweden	2	4	0	5	38	49	3 %
10	South Korea	0	0	0	6	37	43	3 %
	Total top 10	23	22	19	251	846	1161	68 %

3.5 Institutions

Using information regarding the authors' affiliation, the data set enables us to identify the research institutions focusing on electric vehicles. The ten most frequently affiliated institutions are presented in Table 4 with publications over the last four years in separate columns. A total of 36 institutions published at least ten articles on the topic. It is evident that University of California (United States) represented by two campuses in the list is the most frequent affiliation for authors publishing articles on electric vehicles, followed by Delft University of Technology (The Netherlands). Table 4 further demonstrates that except Tsinghua University (China), all the top affiliated institutes are from the US and Western Europe (the Netherlands, Germany, Denmark and Sweden). According to IEA (2017), the US, Norway and the Netherlands accounted for 40% of the global electric car stock in 2016.

A major aspect of the most frequently publishing universities identified in Table 4 is that they are technically oriented, e.g. Delft University of Technology, Danish Technical University, and Chalmers. A likely explanation is that these technical universities not only focus on the development of technologies but also address how these technologies are shaping societies. As such, these universities employ not only engineers but also social scientists.

Table 4 – The ten most frequently publishing academic affiliations on electric vehicles

	AFFILIATION	1995-2014	2015	2016	2017	2018	TOTAL	PROPORTION OF DATA SET
1	University of California, Davis	17	5	2	2	4	30	2.6 %
2	Delft University of Technology	12	4	4	4	4	28	2.4 %
3	Tsinghua University	3	1	6	12	5	27	2.3 %
4	Technische Universität Chemnitz	8	4	4	6	2	24	2.1 %
5	University of California, Berkeley	4	1	7	4	6	22	1.9 %
6	Danmarks Tekniske Universitet	3	2	6	7	3	21	1.8 %
7	Carnegie Mellon University	7	2	3	2	3	17	1.5 %
8	Karlsruhe Institute of Technology	1	3	2	2	9	17	1.5 %
9	Chalmers University of Technology	6	0	3	4	3	16	1.4 %
10	Clemson University	5	2	3	3	3	16	1.4 %
	Total top 10	66	24	40	46	42	218	19 %

3.6 Authors

The ten authors who have written the most articles on electric vehicles between 1995 and 2018 are listed in Table 5. At the top of the list is Josef Krems, who contributed to 17 EV-articles. Krems is a professor of cognitive and engineering psychology at the Chemnitz University of Technology in Germany. Several of Krems' articles are co-authored by Thomas Franke. Franke is a professor of engineering and cognitive ergonomics at the University of Lübeck, and he contributed to 15 EV-articles. Finally, the third most published author on electric vehicles is Jonn Axsen, an associate professor at the Simon Fraser University in Canada.

Evidently, the countries and affiliations with the most published articles on electric vehicles are also well represented on the list with the most productive researchers on the topic. According to Table 3, authors from the United States produced almost one-quarter of all articles on electric vehicles within the social sciences. The United States is also home to three of the most productive researchers, only surpassed by four researchers from German affiliations.

Investigating the number of times the EV articles produced by the most productive authors were cited, the publications by Ken Kurani from University of California, Davis, are ranked first. His 12 articles on the topic were cited 670 times, at an average of 55.8 citations per article. The highest number of citations per article has Yafeng Yin from the University of Michigan, Ann Arbor.

Table 5 – The ten most frequently publishing researchers in the data set

NAME	AFFILIATION	NO. OF ARTICLES ON EV (1995-2018)
Krems, J. F.	Chemnitz University of Technology, Germany	17
Franke, T.	University of Lübeck, Lübeck, Germany	15
Axsen, J.	Simon Fraser University, Burnaby, Canada	14
Kurani, K. S.	UC Davis, Davis, United States	12
Lin, Z.	Oak Ridge National Laboratory, United States	11
Jochem, P.	Karlsruhe Institute of Technology, Germany	9
Plötz, P.	Fraunhofer ISI, Germany	9
He, F.	Tsinghua University, China	8
Sovacool, B.K.	Aarhus Universitet, Denmark	8
Yin, Y.	University of Michigan, Ann Arbor, United States	8

His eight articles were cited 545 times, with a corresponding average of 68.1 citations per article.

It is also worth noting that four of the ten most productive researchers on EVs within the social sciences are associated with four of the institutions listed in Table 4 (UC Davis, Chemnitz University of Technology, Karlsruhe Institute of Technology and Tsinghua University).

4. MOST-CITED ARTICLES ON ELECTRIC VEHICLES

Research quality is a latent construct (Bornmann and Williams, 2017) and can, as such, only be measured using proxies (Hug et al., 2014). One common proxy for research quality is the number of times an article has been cited, which captures an important component of the quality of research, namely its impact (Martin and Irvine, 1983). Although an article might receive a high number of citations due to it being massively promoted among colleagues or dealing with a popular topic, we believe, as did the Norwegian Productivity Commission (NOU 3, 2016), that there is a positive association between citation counts and research quality. This assumption is further strengthened by the failure by Bertocchi et al. (2015) to find systematic differences between bibliometric ranking of articles and their peer review evaluation by experts. Moreover, papers of the highest quality, as measured by independent experts, is 10 times more likely to be in the most cited quintile than in the least cited one (Patterson and Harris, 2009).

Based on the above arguments, we believe that the most cited articles on electric vehicles are the ones who have had greatest impact on this particular research topic, and that they have high quality. The 10 most cited articles on electric vehicles are listed in Table 6 ranked according to the accumulated number of citations for each article. It can be seen that the most cited article is cited 699 times and the 10th most cited article has received 200 citations. Compared to many other fields, such as epilepsy (Ibrahim et al., 2012), software engineering (Garousi and Fernandes, 2016), and neurosurgery (Ponce and Lozano, 2010), these numbers are relatively low. This is probably due to the novelty of this field of research. As can be seen from Figure 1, the annual number of publications on this topic in the social sciences were rather modest prior to 2010.

The most cited article on electric vehicles, with 699 citations, is a review of battery cost estimates (Nykvist and Nilsson, 2015). The second most cited article, with 508 citations, provide environmental life cycle assessments of electric and conventional internal combustion engine vehicles (Hawkins et al., 2013). The third most cited article, with 299 citations, explore range requirements for electric vehicles in the United States (Pearre et al., 2011).

Table 6 – The ten most cited articles on electric vehicles¹

RANK	TITLE	AUTHOR(S)	JOURNAL	CITATIONS (PER YEAR)
1	Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles	Nykvist and Nilsson (2015)	Nature Climate Change	699 (175)
2	Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles	Hawkins et al. (2013)	Journal of Industrial Ecology	508 (85)
3	Electric vehicles: How much range is required for a day's driving?	Pearre et al. (2011)	Transportation Research Part C	299 (37)
4	The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations	Schneider et al. (2014)	Transportation Science	253 (51)
5	Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda	Rezvani et al. (2015)	Transportation Research Part D	240 (60)
6	Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations	Graham-Rowe et al. (2012)	Transportation Research Part A	234 (33)
7	Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles	He et al. (2013)	Transportation Research Part B	214 (36)
8	Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation	Hadley and Tsvetkova (2009)	Electricity Journal	205 (21)
9	Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation	Gruber et al. (2011)	Journal of Industrial Ecology	201 (25)
10	Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data	Dong et al. (2014)	Transportation Research Part C	200 (40)

¹ The number of citations was counted in August 2019. Citations per year are measured by the total number of citations divided by the number of years since publication.

Table 7 – Details on the most cited articles on electric vehicles

<p><i>Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles</i> (Nykqvist and Nilsson, 2015) reviews cost estimates of battery packs for battery electric vehicles and find that industry-wide cost estimates declined by approximately 14% annually between 2007 and 2014.</p>
<p><i>Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles</i> (Hawkins et al., 2013) provides a life cycle assessment of conventional internal combustion engine vehicles and electric vehicles. The authors find that EVs can offer a 10% to 24% reduction in global warming potential, compared to conventional vehicles.</p>
<p><i>Electric vehicles: How much range is required for a day's driving?</i> (Pearre et al., 2011) analyzes daily driving data from gasoline vehicles in the US and found that 9% never drove more than 100 miles in a day and that 21% never drove more than 150 miles in a day. The authors conclude that electric vehicles with limited battery range can, if marketed correctly, find a large enough market to generate substantial sales.</p>
<p><i>The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations</i> (Schneider et al., 2014) applies a hybrid heuristic that combines a variable neighborhood search algorithm with a tabu search heuristic to solve the electric vehicle-routing problem.</p>
<p><i>Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda</i> (Rezvani et al., 2015) presents an overview of drivers for and barriers against consumer adoption of plug-in EVs. Moreover, it gives an overview of theoretical perspectives used in research on consumer intentions and behaviors towards electric vehicles.</p>
<p><i>Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations</i> (Graham-Rowe et al., 2012) identifies potential barriers for mainstream consumers adopting plug in hybrid cars. Among these are the prioritization of personal mobility needs over environmental benefits and the belief that rapid technological development make current models obsolete.</p>
<p><i>Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles</i> (He et al., 2013) proposes a mathematical program to solve the problem of optimally allocating public charging stations. The model is solved using an active-set algorithm and has, according to the authors, proven effective and efficient.</p>
<p><i>Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation</i> (Hadley and Tsvetkova, 2009) finds that increasing market penetration of plug in hybrid electric vehicles can create changes for the electric grid. Among other consequences, electricity prices are expected to rise and emissions from utilities will likely increase, if nothing is changed.</p>
<p><i>Global lithium availability: A constraint for electric vehicles?</i> (Gruber et al., 2011) addresses whether global lithium supply can support demand from electric vehicles. The authors conclude that resources can support demand to at least the end of this century.</p>
<p><i>Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data</i> (Dong et al., 2014) assesses the impact of different public charging infrastructure levels on reducing range anxiety among users of battery electric vehicles.</p>

Looking at the number of citations per year, it can be seen that the two most cited articles also has the highest number of citations per year since publication. It should, however, be noted that when calculating citations per year, we did not take into account their exact date of publication, i.e. whether an article was published early or late within a given year. Further information about the ten most cited articles on electric vehicles is provided in Table 7.

The ten most cited articles were published in eight different journals. Two journals have more than one article on the top-10 list; two articles on the list were published in *Journal of Industrial Ecology*, and two articles were published in *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Only the latter is included in the top ten list of journals (see Table 1).

5. CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

Electric vehicles' replacing vehicles with internal combustion engines is considered an important contribution to reducing some of the negative external effects of transportation. Research on electric vehicles can, therefore, contribute to reducing climate change. This chapter investigates the evolution of research on electric vehicles from 24 years ago when it was a marginal research topic to it currently being addressed globally by researchers. The data source used is Scopus, which is the world's largest abstract and citation database of peer-reviewed literature. Articles written in English and published in social science journals between 1995 and 2018, containing the term "electric vehicles" were identified and included in the analyses.

During the period investigated, the environment was the most frequent topic of the articles on electric vehicles. It is not unexpected that the environment is often an important reason for conducting research on electric vehicles. It is also worth noting that within the environmental topic there has been an increasing focus on "CO₂ and greenhouse gases".

The findings presented in this book chapter have implications for researchers, funders of research and policymakers. The study of how frequently different topics are treated in the academic literature on electric vehicles can be used to identify under-researched topics, i.e., knowledge gaps. The data gathered in this study do, for example, indicate that relatively less attention has been given to "Behaviour" than other topics related to EVs, which can be somewhat of a concern as it is a stated policy aim in many countries to increase the EV market share. In addition, by identifying the most influential works on electric vehicles, this book chapter provides a list of classic articles with which researchers in the

field should be familiar, that should be components of the curriculum for courses in electric mobility and that provide insight into the evolution of research on electric vehicles within the social sciences and how that research may develop in the future.

Finally, it is worth noting that this study, consistent with all empirical studies, has some weaknesses. These weaknesses relate primarily to the fact that the database from which our data are drawn, i.e., Scopus, does not include all types of research publications. This may be a particular problem in new and quickly emerging fields of research such as electric vehicles. The primary reason is that the process of publishing research in scientific journals is time-consuming because of extensive peer review processes. Therefore, a greater proportion of the research conducted in such emerging research fields will not have had sufficient time to be published in peer-reviewed scientific journals. This study is also limited to studies published in the last 24 years. However, because the field of research only began to grow in the last 10-year period, we believe that our dataset provides a trustworthy picture of the most important topics and most influential articles on electric vehicles in the social sciences.

REFERENCES

- Aguillo, I. F. (2012) Is Google Scholar useful for bibliometrics? A webometric analysis. *Scientometrics*, 91, 343-351.
- Baker, K. M. (1964) The early history of the term 'social science'. *Annals of Science*. 20(3), 211-226.
- Bertocchi, G., Gambardella, A., Jappelli, T., Nappi, C. A., Peracchi, F. (2015) Bibliometric evaluation vs. informed peer review: Evidence from Italy. *Research Policy*. 44(2), 451-466.
- Bornmann, L., Williams, R. (2017) Use of the journal impact factor as a criterion for the selection of junior researchers: A rejoinder on a comment by Peters (2017). *Journal of Informetrics*. 11(4), 945-947.
- Campanari, S., Manzolini, G., Iglesia, F. G. (2009) Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations. *Journal of Power Sources*. 186, 464-477.
- Clean Energy Ministerial (2016) Electric Vehicles Initiative (EVI).
- Cook, D. J., Greengold, N. L., Ellrodt, A., Weingarten, SR. The relation between systematic reviews and practice guidelines. *Annals of Internal Medicine*. 127(3), 210-216.
- Daziano, R. A., Chiew, E. (2012) Electric vehicles rising from the dead: Data needs for forecasting consumer response toward sustainable energy sources in personal transportation. *Energy Policy*. 51, 876-894.
- Degirmenci, K., Breitner, M. H. (2017) Consumer purchase intentions for electric vehicles: Is green more important than price and range? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 250-260.
- Denyer, D., Neely, A. (2004) Introduction to special issue: Innovation and productivity performance in the UK. *International Journal of Management Reviews*. 5-6(3-4), 131-135.
- Dong, J., Liu, C., Lin, Z. (2014) Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 44-55.
- Egbue, O., Long, S. (2012) Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy Policy*. 48, 717-729.
- Garousi, V., Fernandes, J. M. (2016) Highly-cited papers in software engineering: The top-100. *Information and Software Technology*. 71, 108-128.
- Ginieis, M., Sánchez-Rebull, M. V., Campa-Planas, F. (2012) The academic journal literature on air transport: Analysis using systematic literature review methodology. *Journal of Air Transport Management*, 19, 31-35.
- Graham-Rowe, E., Gardner, B., Abraham, C., Skippon, S., Dittmar, H., Hutchins, R., et al. (2012) Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 46(1), 140-153.
- Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Kesler, S. E., Everson, M. P., Wallington, T. J. (2011) Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? *Journal of Industrial Ecology*. 15(5), 760-775.

- Hadley, S. W., Tsvetkova, A. A. (2009) Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation. *Electricity Journal*. 22(10), 56-68.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H. (2013) Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*. 17(1), 53-64.
- He, F., Wu, D., Yin, Y., Guan, Y. (2013) Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*. 47, 87-101.
- Hug, S. E., Ochsner, M., Daniel, H.-D. (2014) A framework to explore and develop criteria for assessing research quality in the humanities. *International Journal for Education Law and Policy*. 10(1), 55-64.
- Ibrahim, G. M., Carter Snead, O., Rutka, J. T., Lozano A. M. (2012) The most cited works in epilepsy: Trends in the "citation Classics". *Epilepsia*. 53(5), 765-770.
- IEA (2016) Global EV Outlook 2016: beyond one million electric cars.
- IEA (2017) Global EV Outlook 2017: Two million and counting.
- Jula, A., Sundararajan, E., Othman, Z. (2014) Cloud computing service composition: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*. 41(8), 3809-3824.
- Liao, F., Molin, E., van Wee, B. (2017) Consumer preferences for electric vehicles: a literature review. *Transport Reviews*. 37(3), 252-275.
- Martin, B. R., Irvine, J. (1983) Assessing basic research. *Research Policy*. 12(2), 61-90.
- Mathisen, T. A., Hanssen, T.-E. S. (2014) The Academic Literature on Intermodal Freight Transport. *Transportation Research Procedia*, 3, 611-620.
- Matulka, R. (2014) The History of the Electric Car. Department of Energy, USA.
- Mersky, A. C., Sprei, F., Samaras, C., Qian, Z. S. (2016) Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 56-68.
- NOU 3. (2016) Ved et vendepunkt: Fra ressursøkonomi til kunnskapsøkonomi. Produktivitetskomisjonens andre rapport. Oslo.
- Nykvist, B., Nilsson, M. (2015) Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*. 5(4), 329-332.
- Patterson, M. S., Harris, S. (2009) The relationship between reviewers' quality-scores and number of citations for papers published in the journal physics in medicine and biology from 2003-2005. *Scientometrics*. 80(2), 343-349.
- Pearre, N. S., Kempton, W., Guensler, R. L., Elango, V. V. (2011) Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 19(6), 1171-1184.
- Ponce, F. A., Lozano, A. M. (2010) Highly cited works in neurosurgery. Part II: The citation classics. A review. *Journal of Neurosurgery*. 112(2), 233-246.
- Rezvani, Z., Jansson, J., Bodin, J. (2015) Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 34, 122-136.
- Schneider, M., Stenger, A., Goekem, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48, 500-520.
- Schuitema, G., Anable, J., Skippon, S., Kinnear, N. (2013) The role of instrumental, hedonic and symbolic attributes in the intention to adopt electric vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 48, 39-49.
- Strong, W. B., Malina, R. M., Blimkie, C. J. R., Daniels, S. R., Dishman, R. K., Gutin, B., et al. (2005) Evidence based physical activity for school-age youth. *Journal of Pediatrics*. 146(6), 732-737.
- Theodorson, G. A., Theodorson, A. G. (1969) Modern Dictionary of Sociology. New York: Crowell.
- Travesset-Baro, O., Rosas-Casals, M., Jover, E. (2015) Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 34,16-26.
- Xie, P. (2015) Study of international anticancer research trends via co-word and document co-citation visualization analysis. *Scientometrics*. 105(1), 611-622.
- Zhao, S. J., Heywood, J. B. (2017) Projected pathways and environmental impact of Chain's electrified passenger vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 53, 334-353.

Indagine sulle barriere all'acquisto delle auto elettriche. Evidenze su un campione di rispondenti italiani

MARCO GIAN SOLDATI, ADRIANA MONTE,
MARIANGELA SCORRANO, ANDREA PARMA

1. INTRODUZIONE

Una delle modalità attraverso le quali l'auspicato processo di decarbonizzazione nei trasporti si può realizzare passa indubbiamente attraverso la transizione verso la mobilità elettrica. Il progressivo abbandono dei mezzi endotermici è di particolare importanza se si considera che la maggior parte delle emissioni totali di gas ad effetto serra nell'Unione Europea sono imputabili al settore dei trasporti su gomma. Infatti, autovetture, furgoni ed autobus sono responsabili per oltre il 70% di tali emissioni con il restante 30% ascrivibile invece al trasporto aereo ed a quello marittimo.¹ In Italia il trasporto su strada rappresenta il 21,6% del totale delle emissioni nazionali di CO₂ ed è il principale responsabile delle emissioni di anidride carbonica nel più ampio settore dei trasporti, con una quota pari al 92,9% nell'anno 2017 (Ispra, 2019, p. 57). Il trasporto su gomma nel nostro Paese è anche la principale fonte di emissione nell'atmosfera di due agenti inquinanti particolarmente dannosi per la salute umana, ovvero il particolato (PM_{2,5}) e l'ossido di azoto e (NO_x).²

¹ <https://www.eea.europa.eu/it/themes/transport/intro>

² <https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2019-country-fact-sheets/italy>

Appare quindi preoccupante come il grado di penetrazione dei veicoli elettrici a batteria in Italia si attesti su percentuali ancora molto contenute, pari allo 0,5% del totale delle immatricolazioni tra gennaio e ottobre 2019.³ Sebbene il dato sia in apprezzabile crescita rispetto allo 0,3% registrato nel settembre dello scorso anno, è ancora certamente lontano ai valori di alcuni paesi del Nord Europa. I dati ACEA (2019) relativi alle immatricolazioni fino al terzo trimestre del 2019 evidenziano una quota delle sole auto elettriche a batteria sul totale delle auto immatricolate pari al 28,7% per la Norvegia, al 9,3% per i Paesi Bassi, al 6,3% per l'Islanda, al 4,4% per la Svezia ed al 3,7% per la Svizzera. La maggior parte dei paesi europei però evidenzia percentuali inferiori a questi livelli, con risultati migliori per nazioni di più modeste dimensioni come Portogallo (3%), Austria (2,8%), Irlanda (2,5%) e Danimarca (2,2%). Sembrano invece arrancare gli Stati più popolosi e con una maggiore tradizione nella produzione di auto-veicoli, sebbene con risultati leggermente migliori a quelli nostrani. La Francia mostra un grado di penetrazione pari all'1,8%, la Germania dell'1,7% ed il Regno Unito dell'1,3%. La Spagna, altro importante produttore e certamente rilevante mercato di sbocco, si attesta allo 0,8%.

È verosimile che siano varie le motivazioni che hanno portato a questi risultati nelle differenti nazioni. È possibile richiamare l'eterogeneità nei livelli di reddito procapite, nelle abitudini di mobilità, nelle reazioni alle innovazioni tecnologiche e ad una differente sensibilità ambientale. Diverse sono anche nei differenti paesi le politiche di incentivazione all'acquisto delle auto elettriche con misure di generosità diversa all'interno delle singole nazioni per interventi eterogenei a livello regionale. Diversa è anche la densità delle infrastrutture di ricarica e la relativa potenza, aspetto determinante per la diffusione su larga scala delle auto elettriche. È indubbia anche la limitatezza nella varietà di modelli offerta da parte delle case produttrici, finora prevalentemente orientate a soddisfare una clientela di segmento medio/alto.

Vi sono certamente anche fattori che influenzano le decisioni di acquisto espressione di una sfera prettamente personale che include una dimensione psicologica relativa ad elementi latenti come percezioni e pregiudizi, chiaramente associati a fenomeni non direttamente osservabili.⁴

³ http://www.unrae.it/files/06%20ottobre%202019%20Top%2010%20alimentazione_5dc04e27db892.pdf

⁴ L'impatto di tali variabili latenti nel processo di scelta viene spesso analizzato attraverso modelli ibridi. A tale proposito rimandiamo il lettore interessato ai lavori di Giansoldati et al. (2019a), per il caso italiano, e Giansoldati et al. (2019b), per un confronto della struttura delle preferenze tra italiani e sloveni, quando le variabili latenti sono il livello di conoscenza dell'auto elettrica e il livello di preoccupazione ambientale.

Sulla scorta di tali premesse, questo lavoro mira a mettere in evidenza se e con quale intensità un campione di soggetti italiani intervistati nel giugno 2019 e rappresentativi della realtà nazionale, sono concordi con una serie di affermazioni espressione di potenziali barriere alla penetrazione delle auto elettriche nel nostro Paese. Il presente lavoro fornisce un contributo innovativo in letteratura in cui è assente, per il caso italiano, una sistematica ed esplicita valutazione degli ostacoli all'ampia elettrificazione della mobilità, sebbene anche in ambito estero sia limitato il numero dei contributi che si sono indirizzati con chiarezza ed in modo puntuale verso questo obiettivo. Il nostro lavoro è utile per il decisore pubblico che può identificare aree di intervento su cui agire autonomamente ed altri in cui dialogare con il settore privato. Quest'ultimo, in particolare nella figura delle case produttrici di autoveicoli, può trarre beneficio dalle informazioni che lo studio evidenzia per segmentare il mercato e definire strategie di marketing appropriate in base al tipo di clientela che desidera coinvolgere e, quindi, in base alla quota di mercato che il produttore stesso desidera raggiungere per la propria offerta di veicoli elettrici.

Il lavoro è organizzato nel modo seguente. La Sezione 2 presenta la letteratura rilevante, la Sezione 3 descrive l'indagine, il questionario e le caratteristiche del campione. La Sezione 4 fornisce una valutazione delle barriere all'acquisto dell'auto elettrica da parte del campione e delle caratteristiche socio-economiche associate al giudizio fornito. La Sezione 5 propone strumenti per ridurre il numero delle barriere attraverso l'analisi delle componenti principali (ACP) e l'analisi dei gruppi (*cluster analysis*). La Sezione 6 mira all'individuazione di cluster di individui con comportamenti simili. La Sezione 7 conclude e fornisce indicazioni per il decisore pubblico e per le case produttrici di automobili.

2. LETTERATURA RILEVANTE

Esiste un'ampia letteratura che si è occupata di fornire con strumenti metodologici diversi e con riferimento a numerosi paesi e campioni di individui un'analisi sulle motivazioni che spingono i potenziali compratori di un veicolo verso un modello endotermico piuttosto che uno a combustione alternativa, ad esempio ibrido, ibrido plug-in o puramente elettrico. Nella maggior parte di questi studi non si è spesso esplicitato il concetto di barriera all'acquisto del veicolo elettrico ma, coerentemente con gli scopi di ogni singola indagine, si sono delineati i fattori che spingevano gli individui osservati ad attribuire gradi diversi di utilità (o di disutilità) a caratteristiche del veicolo considerato (in esercizi di scelta dichiarata o rivelata), o ad esaminare intenzioni di acquisto legate spesso a caratteristiche socio-economiche e demografiche dell'indi-

viduo osservato. Considerata quindi l'eterogeneità e l'ampia numerosità dei lavori, vale la pena richiamare in questa sede, a nostro parere, solo i contributi che si sono posti come obiettivo quello di esplicitare gli ostacoli all'acquisto delle auto con alimentazione alternativa a quella fossile, con particolare attenzione alle auto elettriche.

Gli sforzi dei ricercatori per sistematizzare le barriere hanno portato a raggruppamenti eterogenei con scelte di aggregazione che scontano, come è prevedibile, un certo margine di soggettività. A nostro parere è quindi non necessario richiamare in dettaglio le singole classificazioni proposte, ma delinearle invece in modo sommario, lasciando al lettore interessato la possibilità di esaminarle con maggiore precisione, attraverso i contributi che hanno fornito un rassegna estremamente precisa che comprende anche la definizione degli ostacoli raccolti in contributi che si basano su esercizi di scelta con preferenze dichiarate o rivelate. È questo il caso di Biresselioglu et al. (2018) e Berkeley et al. (2018), che descriveremo in modo sintetico nel seguito della Sezione.

Coerentemente con questa premessa, segnaliamo il primo pionieristico tentativo di esplicitazione delle barriere all'acquisto di veicoli ad alimentazione non fossile da parte di Egbue e Long (2012) che hanno considerato il caso statunitense e notato che le preoccupazioni associate all'acquisto di un'auto non endotermica (completamente elettrica, plug-in ed ibrida) sono date, in ordine di importanza, dall'autonomia di percorrenza, dall'alto prezzo di acquisto, dall'affidabilità e dalla sicurezza. Tali barriere vengono percepite in modo diverso a seconda delle caratteristiche socio-economiche dei rispondenti. In particolare, i maschi tendono ad esprimere maggiore preoccupazione per l'autonomia di percorrenza, mentre le donne sono più preoccupate dal costo di acquisto. Inoltre, i maschi sono particolarmente convinti nel definire l'auto elettrica come un mezzo di trasporto sicuro, mentre le donne su questo aspetto si dimostrano invece incerte. Gli autori inoltre rilevano come sostenibilità e consapevolezza verso l'ambiente svolgono un ruolo importante nell'intenzione di acquisto di un'auto elettrica, anche se in misura minore rispetto a prezzo e prestazioni. Più recentemente l'analisi di She et al. (2017) ha identificato per il caso cinese, attraverso un'indagine condotta nella città di Tianjin, quali sono le barriere che prevengono una massiccia diffusione dei veicoli elettrici. Gli autori raggruppano le barriere in tre insiemi, uno di tipo finanziario, uno legato alle prestazioni del veicolo ed uno connesso alle infrastrutture. I risultati del loro studio evidenziano che la gran parte dei rispondenti decide di tenere un atteggiamento attendista sull'acquisto di un'auto elettrica, ed i principali ostacoli dichiarati riguardano sicurezza, affidabilità ed autonomia. Le barriere che però incidono di più su una maggiore penetrazione delle auto elettriche sono date dall'alto costo delle batterie e dalla scarsa dotazione di

infrastrutture pubbliche di ricarica. I soggetti più anziani hanno un atteggiamento più positivo verso le auto elettriche rispetto ai soggetti più giovani ed una maggior intenzione d'acquisto è espressa dai soggetti che manifestano una preoccupazione ambientale.

Di particolare interesse è il quadro fornito da Biresselioglu et al. (2018) il cui obiettivo è mappare le barriere, ed anche le motivazioni, che governano la diffusione delle auto elettriche nei paesi dell'Unione Europea attraverso un'accurata rassegna della letteratura che considera tre livelli decisionali differenti: formale, collettivo ed individuale. All'interno di quest'ultimo, che è quello di interesse per la nostra analisi, gli autori isolano in letteratura sei tipologie di barriere. La prima riguarda l'assenza di un numero sufficiente di infrastrutture di ricarica che spinge i guidatori a considerare il passaggio verso la mobilità elettrica solo quando sarà garantita una maggiore densità. La seconda comprende aspetti di natura economica identificati con l'elevato prezzo d'acquisto del veicolo, con il rapido tasso di deprezzamento derivante dal veloce progresso tecnologico, con l'incertezza sul costo della ricarica, sulla durata della batteria e quindi sulle spese necessarie per una sua sostituzione. La terza comprende elementi di incertezza tecnologica che includono l'autonomia di percorrenza, il tempo di ricarica, la limitata accelerazione e l'assenza di rumore in fase d'uso che rende le auto elettriche pericolose nei confronti dei pedoni. La quarta riguarda la mancanza di fiducia sui benefici ambientali associati all'impiego delle auto elettriche dovuta al fatto che il mix energetico per la produzione di energia elettrica comprende anche fonti fossili. La quinta riguarda aspetti individuali come, ad esempio, la scarsa conoscenza degli effetti dell'uso dell'auto elettrica sul cambiamento climatico, la difficoltà da parte dei potenziali acquirenti nel trovare le informazioni su auto e mobilità elettrica che siano affidabili. La sesta barriera infine include aspetti connessi con la praticità del veicolo, per cui gli automobilisti considerano l'uso del veicolo elettrico molto vincolante perché devono pianificare i propri viaggi in anticipo e con notevole precisione (aspetto che si lega all'autonomia di percorrenza ed alla densità delle colonnine di ricarica).

Strettamente legato al nostro obiettivo è il lavoro di Berkeley et al. (2018). Gli autori realizzano un'eccellente rassegna della letteratura sulle barriere all'acquisto delle auto elettriche analizzando 95 contributi e, diversamente dai precedenti studi sul campo, svolgono la loro indagine su un campione di 26.000 automobilisti del Regno Unito.⁵ Ad essi viene richiesta la valutazione di 19 barriere. I risultati della loro indagine mostrano che 7 delle barriere proposte non sono

⁵ Rimandiamo il lettore interessato alla lettura dell'eccellente contributo che presenta un livello di dettaglio decisamente superiore a quello opportuno per gli scopi del presente lavoro. La rassegna realizzata da Berkeley et al. (2018) comprende barriere all'acquisto delle auto elettriche sia quando esplicitate come tali in indagini *ad hoc* sia quanto derivate e/o dedotte da

considerate tali dagli intervistati. Un'analisi fattoriale applicata sulle rimanenti 12 porta all'individuazione di due fattori, uno espressione dell'incertezza economica e l'altro di preoccupazioni socio-tecnologiche. L'incertezza economica include l'alto prezzo di acquisto, il periodo di tempo per compensare un prezzo di acquisto più elevato attraverso risparmi in termini di carburante e tasse, l'ansietà per il valore di rivendita, l'incertezza su manutenzione, infrastrutture di assistenza e riparazione, la povertà di scelta derivante da una scarsa varietà che si rileva sul mercato dei veicoli elettrici. Diversamente, le preoccupazioni socio-tecnologiche includono la disponibilità di stazioni di ricarica pubbliche, l'ammontare del tempo necessario per caricare il veicolo elettrico, la limitata autonomia di percorrenza per le esigenze quotidiane di spostamento dell'individuo, ma anche preoccupazioni sulla durata della batteria, il timore che il comportamento di guida e l'uso delle funzioni del veicolo possano ridurre l'autonomia di percorrenza, e l'incertezza riguardo al processo di ricarica domestica/pubblica. Gli autori evidenziano una relazione tra età e luogo di residenza del soggetto (Londra o meno) con le barriere legate all'incertezza economica, mentre le preoccupazioni socio-tecnologiche sono legate al genere (le donne sono generalmente più scettiche nell'adozione della tecnologia elettrica). Il parallelismo tra il contributo di Berkeley et al. (2018) ed il nostro lavoro sta nel tentativo di fornire indicazioni sulla presenza e sull'intensità delle barriere relativamente ad un campione rappresentativo della popolazione italiana, evitando, come nel caso cinese, di limitarci ad un'estrazione di individui che appartengono ad un solo centro urbano. Si tratta di un importante elemento di novità di questo lavoro, perché al momento attuale non vi è alcun contributo che abbia proposto per l'Italia un'analisi sulle barriere all'acquisto delle auto elettriche.

3. L'INDAGINE

L'indagine riguarda un campione di soggetti rappresentativi della popolazione italiana inizialmente contattati nell'ottobre 2018 per la somministrazione di un questionario volto a raccogliere informazioni di natura socio-economica e proporre esercizi di scelta tra un'auto elettrica ed una endotermica. A questo stesso campione è stato somministrato durante il mese di luglio 2019 un questionario contenente una lista di affermazioni ciascuna delle quali è espressione di una potenziale barriera che si suppone possa ostacolare l'acquisto di un'auto elettrica. Rispetto ai 1029 patentati che avevano fornito risposta durante il mese di

analisi in cui non vengono etichettate come barriere, ma vengono ad esse assimilate, come nel caso degli esercizi di scelta discreta tra veicoli con diversa alimentazione.

ottobre 2018, hanno completato l'intervista 870 soggetti, con un soddisfacente *redemption rate* pari a circa l'85%.

3.1 Il questionario

Come sopra introdotto il questionario è costituito da una lista di affermazioni. Ognuna di esse si riferisce ad una potenziale barriera. Rispetto a tali affermazioni i soggetti sono stati chiamati ad esprimere il proprio grado di concordanza, attribuendo un punteggio descritto attraverso una scala Likert. In dettaglio, il questionario somministrato si è strutturata esattamente come riportato di seguito, ma per esigenze di compattezza lo presentiamo in forma tabellare.

Indicare con un valore da 1 a 4 il proprio grado di adesione alle seguenti affermazioni, ove 1 indica l'essere completamente in disaccordo, 2 parzialmente in disaccordo, 3 parzialmente d'accordo e 4 completamente d'accordo.

Barriere legate all'utilizzabilità	Praticità	La necessità di ricaricare frequentemente vista la limitata autonomia della batteria rende l'auto elettrica ben poco pratica nell'uso quotidiano.
	Pianificazione	Utilizzare un'auto elettrica richiede un'attenta pianificazione dei viaggi.
	Ansietà	Se guidassi un'auto elettrica sarei sempre preoccupato di rimanere senza carica.
	Distanze lunghe	Utilizzare un'auto elettrica per lunghe distanze è difficile a causa della scarsa presenza di stazioni di ricarica in autostrada.
	Tempi di ricarica	Ricaricare un'auto elettrica durante il viaggio richiede un tempo troppo lungo.
Barriere legate alle infrastrutture di ricarica	Problema ricarica	L'auto elettrica pone un problema di dove caricare e a quali costi, soprattutto a chi non ha un garage proprio.
	Colonnine insufficienti	Credo che attualmente il numero delle colonnine sia ancora troppo basso, preferisco aspettare.
	Adeguamento impianto elettrico	La realizzazione di un'infrastruttura di ricarica domestica è un processo burocraticamente complicato e costoso, soprattutto in un condominio.
	Bolletta elettrica	Mi preoccupa che il prezzo dell'energia elettrica per la ricarica domestica determini un incremento significativo delle mie spese in bolletta.

Barriere legate alla sicurezza e alla tecnologia	Sicurezza	Non mi sentirei sicuro ad utilizzare un'auto elettrica vista la presenza di una batteria di elevate dimensioni, anche alla luce del rischio di incendio.
	Rischio tecnologico	Non mi fido delle nuove tecnologie su cui si basano le auto elettriche in quanto sono complesse. Preferisco un'auto semplice.
	Vantaggi ambientali	Non sono convinto che le auto elettriche inquinino meno delle auto tradizionali in quanto l'elettricità è generata anche da carbone e petrolio.
	Smaltimento batteria	Non sono convinto che le auto elettriche inquinino meno delle auto tradizionali a causa dello smaltimento della batteria.
	Durata della batteria	La batteria delle auto elettriche è costosa e non si sa ancora bene quanto duri.
Barriere legate all'incertezza economica	Prezzo	Il prezzo d'acquisto è ancora troppo elevato. Preferisco attendere.
	Costo energia elettrica	Se molti passano alle auto elettriche, il costo dell'energia elettrica probabilmente aumenterà per cui diventeranno meno vantaggiose.
	Valore residuo	C'è un forte rischio che l'auto elettrica comprata oggi si deprezzi molto rapidamente
	Riparazioni e manutenzioni	Essendo poche non c'è un numero sufficiente di meccanici preparati per intervenire sulle auto elettriche.
Barriere legate alle prestazioni	Accelerazione	Le automobili elettriche non hanno un'accelerazione sufficiente.
	Piacere di guida	Le automobili elettriche non permettono di sentire il rombo del motore durante i cambi.
<p><i>Ulteriori barriere che volete segnalare. Le saremmo molto grati se potesse gentilmente indicare ulteriori barriere da Lei rilevate e da noi non proposte nelle Sezioni precedenti. Molte grazie. (Risposta aperta).</i></p>		

Come si può notare dal testo abbiamo optato per imporre all'intervistato di prendere una posizione di concordanza o meno con l'affermazione proposta, evitando di inserire un'opzione di risposta che permettesse di esprimere neutralità tra l'accordo e il disaccordo.

3.2 Caratteristiche del campione

La struttura del campione dei soggetti rispondenti a quest'indagine non è molto diversa da quella del campione del 2018 e le cui caratteristiche sono descritte in Giansoldati et al. (2019c). Nella Tabella 1 vengono richiamate le caratteristiche principali dei soggetti intervistati.

Tabella 1 – Statistiche descrittive del campione

INFORMAZIONI SOCIO-ECONOMICHE
<ul style="list-style-type: none">• Genere: Maschi: 53,2%; Femmine: 46,8%.• Età: da 18 a 24 anni: 9,0%, da 25 a 34 anni: 17,4%; da 35 a 44 anni: 25,6%; da 45 a 54 anni: 24,6%; da 55 a 65 anni: 23,4%.• Livello di istruzione: fino a media inferiore: 5,8%; diploma istituto professionale (3 anni): 3,1%; diploma maturità: 39,7%; università in corso o nessuna laurea: 7,7%; diploma universitario o laurea breve: 4,0%; laurea triennale: 9,2%; laurea magistrale: 22,1%; master o scuola di specializzazione: 6,3%; dottorato di ricerca: 2,1%.• Attuale impiego: imprenditore: 3%; artigiano: 0,5%; commerciante: 1,1%; altro lavoratore autonomo: 2,5%; libero professionista: 9,2%; dirigente: 2,1%; docente: 3,1%; insegnante: 1,5%; quadro: 7,2%; impiegato: 34,7%; altro lavoratore dipendente: 3,6%; operaio: 4,6%; agricoltore: 0,1%; studente: 7,7%; in cerca di prima occupazione: 1,7%; casalinga: 7,7%; pensionato: 2,9%; disoccupato: 6%; altro non occupato: 0,7%; non risponde: 0,1%.• Reddito familiare: meno di €30,000 all'anno: 48%; tra €30,000 e €70,000 all'anno: 45,2%; più di €70,000 all'anno: 6,8%.• Livello percepito di ricchezza: Domanda: "E se dovesse fare un bilancio, direbbe che il suo reddito familiare le consente di vivere...". Risposta: "Agiatamente": 1,7%; "Con tranquillità": 44,8%; "Avverto difficoltà": 39,5%; "Arrivo a fine mese con molte difficoltà": 11,4%; "Mi sento povero e non arrivo mai a fine mese": 2,5%.
Localizzazione
<ul style="list-style-type: none">• Per dimensione del centro urbano: più di 500 mila abitanti: 19,20%; 100-500 mila abitanti: 17,93%; 50-100 mila abitanti: 12,99%; 10-50 mila abitanti: 29,77%; meno di 10 mila abitanti: 20,11%.• Per regione: Piemonte: 6%, Liguria: 3,3%, Lombardia: 18,4%, Trentino: 0,7%, Veneto: 8,2%, Friuli Venezia Giulia: 1,8%, Emilia Romagna: 6,7%, Toscana: 4,3%, Umbria: 1,6%, Marche: 2,2%, Lazio: 11,7%, Abruzzo: 2,2%, Molise: 0,1%, Campania: 8,2%, Puglia: 8,2%, Basilicata: 1,1%, Calabria: 2,9%, Sicilia: 9,4%, Sardegna: 3,1%.

POSSESSO DELL'AUTO E DEL GARAGE
<ul style="list-style-type: none"> • Numero di auto possedute all'interno del nucleo familiare: 0 auto: 0,9%; 1 auto: 39,5%; 2 auto: 46,5%; 3 auto: 9,4%; 4 auto: 3,1%; 5 auto: 0,3%; 6 auto: 0,2%. • Numero di individui all'interno del nucleo familiare che sono in possesso della patente di guida: 1: 14,8%; 2: 44,3%; 3: 24,6%; 4: 13,8%; 5: 2,2%; 6: 0,2%; 8: 0,1%. • Disponibilità di un garage: Sì: 70,9%; No: 29,1%.
MOBILITÀ CON L'AUTOMOBILE
<ul style="list-style-type: none"> • Numero medio di chilometri percorsi al giorno: ≤ 10 km: 28,1%; 11-50 km: 53,2%; 51-100 km: 14,9%; >100 km: 3,8%. • Numero medio di chilometri percorsi all'anno: ≤ 5,000 km: 23,8%; 5,001-10,000 km: 23,8%; 10,001-20,000 km: 35,3%; 20,001-50,000 km: 14,3%; >50,000 km: 2,8%. • Numero di viaggi all'anno (andata e ritorno) con distanza superiore a 400km: ≤ 10: 93,7%; >10: 6,3%.
CONOSCENZA DELL'AUTOMOBILE
<ul style="list-style-type: none"> • Livello auto-dichiarato di conoscenza delle auto elettriche (1=Nulla, 7=Molto alta): 1: 11,4%; 2: 18,5%; 3: 20,0%; 4: 15,3%; 5: 23,1%; 6: 8,0%; 7: 3,7%. • Esperienza di guida di un'auto elettrica: Sì: 15,5%; No: 85,5%. • Prossimità a stazioni di ricarica veloce: Domanda: "Vicino al luogo in cui vive o lavora (o studia) ci sono stazioni di ricarica per auto elettriche?" Risposta: "Sì": 38,5%. "No": 39,7%. "Non lo so": 21,8%.
ATTITUDINE VERSO L'AMBIENTE
<ul style="list-style-type: none"> • Associazione ambientale: Domanda: "Ha mai partecipato ad una manifestazione ambientalista o si è mai iscritto ad una associazione ambientalista?" Risposta: "Sì": 18,7%; "No": 81,3%. • Preoccupazione ambientale: Domanda "La situazione ambientale del luogo in cui vivo mi preoccupa sempre di più. Lei è...". Risposta: "Completamente d'accordo": 29,3%, "Abbastanza d'accordo": 57,4%, "Abbastanza in disaccordo": 11,8%, "Completamente in disaccordo": 1,5%.

Tutte le regioni, esclusa la Valle d'Aosta, sono rappresentate nel campione ed esso è distribuito tra le regioni proporzionalmente in base alla loro popolazione. Per quanto riguarda la dimensione socio economica, il campione vede una legge-

ra prevalenza degli uomini (53,2%), rispetto alle donne (46,8%).⁶ La classe di età prevalente è quella tra 35-44 anni, seguita a breve distanza da quella tra 45-54 e quindi da quella tra 55-64 anni con percentuali del 25,6% per la prima, 24,6% per la seconda e 23,4% per la terza. Il titolo di studio prevalente è il diploma di scuola superiore con il 39,7%, seguito dalla laurea magistrale con il 22,1%. La maggior parte degli intervistati sono impiegati dipendenti (quadri inclusi), circa il 54,7%, e nel 93,2% dei casi non guadagnano più di 70.000 Euro all'anno. In particolare, il 48% dichiara un reddito annuale del nucleo familiare fino a 30.000 Euro, mentre il 45,2% dichiara un reddito tra 30.000 e 70.000 Euro. Il 44,8% dei rispondenti afferma che il reddito percepito permette loro di vivere con tranquillità, ma una percentuale del 39,5% afferma invece di avvertire difficoltà e l'11,4% dichiara di avere molte difficoltà. La maggioranza della popolazione vive in centri urbani con meno di 100.000 abitanti.

Se osserviamo il numero di individui all'interno del nucleo familiare che sono in possesso della patente di guida, notiamo che nel 44,3% dei casi tale numero è pari a due, e nel 24,6% è pari a tre. Per quanto attiene, invece, il numero delle auto possedute all'interno del nucleo familiare, il 39,5% dichiara di possedere un'auto e il 46,5% di possederne due. Solo il 9,4% ne possiede tre. Buona parte degli intervistati, il 70,9%, ha a disposizione un garage.

Rispetto al numero medio di chilometri percorsi al giorno, quasi tutti i rispondenti coprono distanze compatibili con l'autonomia di percorrenza attualmente garantita dalle auto elettriche in circolazione e solo il 3,8% percorre più di 100 km al giorno. In termini di numero medio di chilometri percorsi all'anno, il 14,3% dei rispondenti ne percorre più di 20.000. Più di un terzo dei rispondenti percorre tra 10.000 e 20.000 km all'anno e il 47,6% meno di 10.000, livello che rende difficilmente competitiva l'auto elettrica ai correnti prezzi di mercato.⁷ Quasi tutti gli intervistati realizzano meno di 10 viaggi (di andata e ritorno) di distanza superiore ai 400 km in un anno.

⁶ La popolazione residente in Italia al 1° gennaio 2019 è composta per 48,7% da uomini e per il 51,3% da donne (si veda la seguente URL: http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCIS_POPRES1, ultimo accesso 06 novembre, 2019)

⁷ Per il caso italiano, la convenienza all'acquisto di un'auto elettrica rispetto ad una corrispondente endotermica è stata analizzata, attraverso l'analisi del costo totale di possesso, da Danielis et al. (2018) in cui si fa uso di un approccio probabilistico e da Scorrano et al. (2019a, 2019b), in cui si considera l'eterogeneità nei comportamenti di guida, di ricarica e di impiego del veicolo in area urbana/extraurbana. Ai fini della comprensione dell'importanza della distanza percorsa per valutare la convenienza dell'uso di un'auto elettrica è molto utile il lavoro di Scorrano et al. (2019c) che analizza il costo totale di possesso dei taxi elettrici per la città di Firenze, evidenziandone la maggiore competitività rispetto ai modelli diesel. La considerazione del chilometraggio percorso è anche determinante per valutare la competitività dei veicoli commerciali leggeri, come studiato da Scorrano et al. (2019d).

È interessante rilevare che il 15,5% degli intervistati ha provato almeno una volta a guidare un'auto elettrica, ma una percentuale più alta, ovvero il 34,8%, afferma di avere un buon livello di conoscenza delle caratteristiche tecniche dell'auto elettrica. È altresì utile notare che sebbene una percentuale di rispondenti pari a 18,7% afferma di aver partecipato ad una manifestazione ambientalista o ad una associazione ambientale, oltre l'85% degli intervistati è d'accordo che la situazione ambientale del luogo in cui vive è sempre più preoccupante (in particolare il 29,3% è completamente d'accordo che sia sempre più preoccupante, rispetto al 57,4% che si dichiara abbastanza d'accordo che la situazione sia sempre più preoccupante). Esiste una notevole incertezza in merito alla presenza delle infrastrutture di ricarica: il 21,8% dei rispondenti non sa se vicino al luogo in cui vive/lavora/studia sono presenti delle colonnine, il 38,5% risponde affermando che vi sono, mentre il 39,7% afferma che non ve ne sono.

4. LE BARRIERE

4.1 *La valutazione degli ostacoli all'acquisto dell'auto elettrica da parte del campione*

Le venti barriere proposte agli intervistati hanno ricevuto valutazioni eterogenee ed alcune di esse non vengono considerate tali da più della metà del campione. Si tratta del rischio tecnologico, della sicurezza, dell'accelerazione e del piacere di guida, come si legge nella Tabella 2, in cui sono evidenziate in arancione. In altri termini, le auto elettriche, sebbene si basino su una nuova e complessa tecnologia, sembrano riscuotere la fiducia dei rispondenti, i quali non avvertono un problema di sicurezza connesso alla presenza di una batteria di notevoli dimensioni, al collegato possibile rischio di incendio, come nel caso di Egbue e Long (2012). Inoltre, gli intervistati non sembrano preoccupati di una insufficiente accelerazione e non dichiarano l'assenza di un piacere di guida connesso all'assenza di un cambio manuale e di una potenziale guida "sportiva" associata ad un rombo udibile in fase di cambi di marcia, analogamente a Schmalfuß et al. (2017).

L'ultima colonna della Tabella riporta i valori medi delle modalità della scala di Likert per ciascuna barriera, dal più alto al più basso, passando quindi da ostacoli di maggiore rilevanza ad altri che invece vengono percepiti come di minore impatto nella scelta dell'auto elettrica.⁸

⁸ Per poter costruire questo ranking abbiamo ipotizzato che i valori da 1 (completamente in disaccordo) a 4 (completamente d'accordo) siano misurati su una scala di intervalli. "Nelle

Osserviamo che gli ostacoli di maggiore rilevanza sono dati dalla convinzione che la diffusione delle infrastrutture di ricarica sia ancora troppo scarsa, come nel caso di Lane e Potter (2007) Browne et al. (2012), Axsen e Kurani (2015), Wan et al. (2015), e che questo influenzi la possibilità di realizzare viaggi lunghi vista la limitata presenza di colonnine in autostrada (come nel caso di Haustein e Jensen, 2018). Ostacolo di notevole rilievo è ovviamente dato dal prezzo di acquisto che riceve una valutazione molto simile a quella relativa alla rete di ricarica, in modo analogo a Diamond (2009), Egbue e Long (2012), Carley et al. (2013).

Ostacoli di importanza non trascurabile e strettamente connessi alle caratteristiche dell'infrastruttura di ricarica comprendono la difficoltà nella pianificazione dei viaggi (e.g. Haustein e Jensen, 2018), i lunghi tempi di ricarica a cui è esposto il guidatore (e.g. Steinhilber et al., 2013), ed anche l'incertezza associata ai costi della medesima ricarica, analogamente a Graham-Rowe et al. (2012).

Si rilevano con un punteggio superiore a 3 (si veda l'ultima colonna della Tabella 2) anche i timori legati alla necessità di sostenere dei costi per adeguare l'impianto elettrico domestico per ricaricare l'auto⁹, le spese che possono emergere per la sostituzione della batteria, la cui durata non è ancora ben chiara, ma che è il componente più costoso dell'auto elettrica (e.g. Daziano e Chiew, 2013), nonché il rischio legato alla difficoltà nel trovare adeguata assistenza nel caso di guasti e manutenzioni per effetto di una ancora limitata presenza di meccanici esperti (Graham-Rowe et al., 2012).

Le restanti barriere presentano tutte un valore più basso di tre, ma esiste notevole differenza tra di esse. Infatti, è particolarmente percepita la poca praticità dell'auto elettrica dovuta alla necessità di ricaricare frequentemente, come nel caso di Haustein e Jensen (2018), esiste un timore per un possibile incremento dei costi in bolletta derivanti da una crescita dei consumi legati alla ricarica domestica, ma anche la preoccupazione che un passaggio massiccio verso la mobilità elettrica possa determinare in futuro un aumento del prezzo dell'energia elettrica. È anche avvertita l'incertezza sul mantenimento del valore dell'automobile nel tempo ed il collegato rischio di rapido deprezzamento

applicazioni si adotta spesso questo criterio (ma di solito senza esplicitarlo) per cui diviene possibile ottenere un punteggio finale per ogni domanda, come media dei punteggi di tutti i rispondenti." (Zani e Cerioli, 2007, p. 17). In realtà, ai numeri "si dovrebbe attribuire a rigore un significato semplicemente ordinale. Per poter considerare questi numeri come misurati su una scala di intervalli occorre accettare l'ipotesi addizionale di equidistanza tra le categorie di risposta" (Zani e Cerioli, 2007, p. 17).

⁹ Si veda a titolo esemplificativo l'evidenza, sebbene aneddotica, riportata a questa URL: <https://www.forumelettrico.it/forum/installazione-wallbox-box-condominiale-la-mia-esperienza-t7596.html> ed a anche a questa: <https://www.vaielettrico.it/la-ricarica-in-condominio-ecco-il-problema/>. Il problema è anche stato analizzato da Todd et al. (2013).

Tabella 2 – Ordinamento dei valori attribuiti alle barriere (distribuzioni percentuali e medie dei punteggi)

ORDINAMENTO	BARRIERE	1	2	3	4	MEDIA
		COMPLETAMENTE IN DISACCORDO	ABBASTANZA IN DISACCORDO	ABBASTANZA D'ACCORDO	COMPLETAMENTE D'ACCORDO	
1	Colonnine insufficienti	1.8%	7.4%	34.9%	55.9%	3.45
2	Prezzo	1.5%	8.6%	34.9%	54.9%	3.43
3	Distanze lunghe	2.5%	7.2%	35.7%	54.5%	3.42
4	Pianificazione	3.2%	10.7%	40.6%	45.5%	3.28
5	Problema ricarica	3.2%	11.1%	43.4%	42.2%	3.25
6	Tempi di ricarica	3.7%	11.6%	47.8%	36.9%	3.18
7	Adeguamento impianto elettrico	4.6%	14.8%	40.9%	39.7%	3.16
8	Durata della batteria	4.0%	16.7%	48.7%	30.6%	3.06
9	Riparazioni e manutenzioni	4.5%	18.0%	46.3%	31.1%	3.04
10	Praticità	5.7%	22.6%	44.9%	26.7%	2.93
11	Bolletta elettrica	8.9%	20.0%	41.7%	29.4%	2.92
12	Costo energia elettrica	6.7%	25.6%	43.6%	24.1%	2.85
13	Valore residuo	7.2%	25.2%	44.8%	22.8%	2.83
14	Ansietà	11.0%	23.1%	43.3%	22.5%	2.77
15	Smaltimento batteria	10.7%	24.6%	42.6%	22.1%	2.76
16	Vantaggi ambientali	18.4%	28.3%	34.3%	19.1%	2.54
17	Rischio tecnologico	24.9%	30.5%	31.6%	13.0%	2.33
18	Sicurezza	22.2%	35.9%	29.4%	12.5%	2.32
19	Accelerazione	24.3%	31.7%	33.7%	10.3%	2.30
20	Piacere di guida	29.2%	26.8%	29.8%	14.3%	2.29

NOTA: La media, riportata nella ultima colonna della Tabella, è stata calcolata ipotizzando una uguale distanza tra le 4 modalità, al fine di definire un ordinamento tra le barriere.

che ne inficerebbe l'attrattività sul mercato dell'usato (e.g. National Research Council, 2015; Lévy et al., 2017; Palmer et al., 2018). È presente la cosiddetta *range anxiety*, ovvero il timore di rimanere senza carica lontano da infrastrutture di ricarica (e.g. Egbue e Long, 2012; Priessner et al., 2018) ed è anche particolarmente percepito il problema dell'impatto ambientale dell'uso delle auto elettriche, espresso soprattutto con riferimento allo smaltimento della batteria, sottolineato anche dal National Research Council (2015), ma anche rispetto al mix energetico, in quanto l'energia elettrica che alimenta le auto risulta comunque prodotta da fonti non rinnovabili (e.g. Heffner et al., 2007; Axsen et al., 2013; Jensen et al., 2013).

4.2 *Barriere e caratteristiche socio-economiche*

Si è analizzata la valutazione data ad ogni barriera sulla base di alcune variabili di natura socio-economica, in particolare genere, reddito, livello di istruzione, livello di conoscenza dell'auto elettrica, esperienza di guida dell'auto elettrica, sensibilità ambientale, misurata come partecipazione ad associazioni ambientali e preoccupazione per le condizioni ambientali del luogo in cui si vive, in modo simile a quanto realizzato da Egbue e Long (2012).

Al fine di analizzare la presenza di diversità in attitudini e percezioni all'interno del campione oggetto di indagine si è deciso in primo luogo di fare uso del test chi-quadrato. Tale test permette di sottoporre a verifica l'ipotesi nulla che due caratteri siano assolutamente indipendenti, contro l'alternativa che non lo siano.

Nel lavoro verificheremo l'ipotesi di indipendenza tra la valutazione di ogni singola barriera e alcune variabili socio-economiche ad un livello di significatività α pari a 0,05. Di conseguenza un valore di p-value $<0,05$ associato alla statistica test è evidenza di una associazione tra variabili.

La Tabella 3 è strutturata nel modo seguente. Nelle righe si leggono le barriere, ognuna valutata su una scala da 1 a 4. Le colonne corrispondono alle variabili socio-economiche, ognuna delle quali presenta un numero di modalità, da un minimo di due (ad esempio il genere), ad un massimo di tre (ad esempio il reddito). Ogni barriera è stata incrociata con ciascuna delle variabili socio-economiche ed è stato calcolato il test chi-quadrato per verificare l'indipendenza tra le due. Nelle celle della tabella sono riportati per ciascun incrocio barriera/variabile socio-economica i soli valori dei p-value inferiori a 0,05. Per esigenze di sintesi non sono state riportate tutte le tabelle a doppia entrata e i valori della statistica test.

La tabella mette in evidenza alcuni elementi salienti. L'ipotesi di indipendenza tra barriere e genere è rifiutata per dodici barriere, che in quasi la totalità dei casi sono percepite in modo più opprimente dai rispondenti di sesso femminile. Per quanto riguarda il livello di conoscenza delle auto elettriche, è stata rigettata l'ipotesi di indipendenza per dieci barriere. I soggetti che hanno

Nota per la lettura della tabella:

Reddito del nucleo familiare. Il calcolo del chi-quadro è stato realizzato considerando i tre livelli reddituali sopra descritti, ma con solo due livelli per la scala Likert relativa al grado di concordanza o meno con l'affermazione prevista nel questionario.

Livello di istruzione. Abbiamo creato due livelli, uno che include i soggetti con un grado di istruzione fino al completamento delle scuole medie superiori (la classe più numerosa) ed uno che include i soggetti con un'istruzione di grado almeno pari al diploma di laurea o alla laurea breve, ed abbiamo aggregato i livelli 1 e 2 della scala Likert sulle barriere in un unico livello che esprime il disaccordo, ed unito i livelli 3 e 4 per esprimere l'accordo.

Occupazione. Si è ancora una volta provveduto ad aggregare le numerose categorie in tre gruppi. Il primo è composto da lavoratori autonomi e dipendenti dirigenti che riteniamo possano essere accomunati da un certo grado di omogeneità nel proprio modo di operare all'interno delle strutture in cui sono inseriti. Il secondo è composto da dipendenti, che per la maggior parte sono colletti bianchi (oltre il 60%). Il terzo include soggetti con caratteristiche diverse come pensionati, casalinghe, studenti, ma anche disoccupati e coloro che sono in cerca di una prima occupazione. Anche la scala Likert relativa alla barriere è stata compattata garantendo la presenza di due soli livelli, ovvero accordo e disaccordo.

Conoscenza dell'auto elettrica. La quinta colonna della Tabella 3 mostra i risultati del test in cui si confrontano rispondenti con livelli di conoscenza bassi (livelli da 1 a 4 della scala Likert) con quelli che dichiarano livelli di conoscenza alti (livelli 5, 6 e 7 della scala Likert). Diversamente, la scala di Likert relativa alla risposta sulle barriere viene mantenuta su quattro livelli.

Esperienza di guida auto elettrica. Per la sesta colonna, la scala di Likert sulle barriere è stata ridotta a due livelli, mantenendo solo accordo e disaccordo, mentre l'esperienza di guida ha già di per sé una natura dicotomica.

Associazione ambientale. La scala di Likert per le barriere è stata ridotta a due livelli (accordo e disaccordo) e la partecipazione ad associazione ambientale presenta due sole modalità.

Preoccupazione ambientale. In questo caso la scala di Likert per le barriere è stata ridotta a due livelli e lo stesso si è fatto per la variabile preoccupazione per la situazione ambientale del luogo in cui si vive, originariamente rilevata su quattro livelli.

Tabella 3 – Valori del p-value inferiori a 0,05 del test Chi-quadro tra le barriere e selezionate caratteristiche dei rispondenti

BARRIERE	GENERE	REDDITO	ISTRUZIONE	OCCUPAZIONE	CONOSCENZA	ESPERIENZA	ASSOCIAZIONE AMBIENTALE	PREOCCUPAZIONE AMBIENTALE
UTILIZZABILITÀ								
Praticità	0.001		0.017	0.06	0.007			
Pianificazione		0.030			0.011			
Ansietà	0.000	0.000		0.002	0.001			
Distanze lunghe					0.000		0.000	
Tempi di ricarica							0.015	
INFRASTRUTTURA DI RICARICA								
Problema ricarica	0.016				0.000		0.000	
Colonnine insufficienti					0.000		0.001	
Adeguamento impianto elettrico	0.001	0.033			0.002		0.023	
Bolletta elettrica	0.000	0.001	0.004		0.005		0.004	
SICUREZZA ED ALLA TECNOLOGIA								
Sicurezza	0.000		0.000		0.064			0.027
Rischio tecnologico	0.000		0.000	0.040				
Vantaggi ambientali			0.001					0.018
Smaltimento batteria		0.029						
Durata della batteria	0.044				0.026		0.028	
INCERTEZZA ECONOMICA								
Prezzo		0.026		0.032	0.000	0.049		
Costo energia elettrica	0.002	0.001	0.003					
Valore residuo			0.044					
Riparazioni e manutenzioni	0.003	0.018	0.001		0.003			
PRESTAZIONI								
Accelerazione	0.000	0.002	0.001	0.002		0.019		
Piacere di guida	0.005		0.000			0.049	0.006	0.015

un livello di conoscenza superiore (livelli 5, 6 e 7 della scala di Likert)¹⁰ esprimono, seppur in alcuni casi solo marginalmente, un grado di preoccupazione inferiore rispetto ai soggetti con conoscenza più bassa. Anche per ciò attiene il livello di istruzione, è stata rifiutata l'ipotesi di indipendenza per dieci barriere: i soggetti che hanno almeno un diploma universitario o una laurea breve danno minor rilevanza alle barriere rispetto a coloro che hanno un titolo di studio inferiore. Per quanto attiene il livello del reddito, è stata rigettata l'ipotesi di indipendenza per nove barriere. Maggiore è il reddito del nucleo familiare minore è l'importanza attribuita all'ostacolo proposto, in particolare da parte di coloro che percepiscono un reddito molto alto, ovvero superiore a 70.000 Euro annui. Per ciò che attiene la partecipazione a manifestazione ambientalista o associazione ambientale, è stata rifiutata l'ipotesi di indipendenza per otto barriere. In questi casi vi è una percentuale di rispondenti che sono in disaccordo con l'affermazione proposta dalla barriera che è maggiore rispetto ai soggetti che non hanno mai manifestato o che non sono parte di un'associazione. Per quanto riguarda l'occupazione l'ipotesi di indipendenza è stata rifiutata per cinque barriere. In particolare, i soggetti che lavorano in forma autonoma o come dipendenti ma in funzione dirigenziale attribuiscono un punteggio alle barriere mediamente sempre più basso rispetto a soggetti che sono occupati in mansioni diverse. Per quanto attiene all'esperienza di guida è stata rigettata l'ipotesi di indipendenza in tre casi. La non indipendenza tra l'esperienza di guida dell'auto elettrica e la valutazione della barriera prezzo potrebbe essere ricondotta al fatto che la percentuale di soggetti che ha provato l'auto elettrica sale all'aumentare del reddito familiare ed è quindi lecito assumere che vi sia una diversa percezione del prezzo di acquisto in base alla disponibilità economica del nucleo familiare considerato. Per ciò che attiene la preoccupazione ambientale, è stata rifiutata l'ipotesi di indipendenza per tre barriere. Tra i soggetti che sono d'accordo con l'affermazione che la situazione ambientale del luogo in cui vivono è sempre più preoccupante vi è una percentuale di rispondenti che sono in disaccordo con i dubbi sui vantaggi ambientali derivanti dall'adozione delle auto elettriche che è maggiore rispetto a quella registrata per i soggetti che non sono d'accordo con l'affermazione che la situazione ambientale del luogo in cui vivono è sempre più preoccupante. La diversità tra il numero di barriere significative nel caso dell'affermazione sull'associazionismo rispetto a quella sulla preoccupazione ambientale potrebbe lasciar supporre che chi è intensamente impegnato in un'attività a protezione dell'ambiente abbia maggiore e più complessa sensibilità nei confronti delle

¹⁰ Come riportato nella Tabella 1, il livello di conoscenza è misurato attraverso una scala di Likert che va 1, ovvero nullo, a 7, ovvero molto alto.

azioni da intraprendere per favorire la diffusione delle auto elettriche, rispetto a chi si dichiara genericamente “preoccupato” per l’ambiente.

5. ANALISI DELLE VARIABILI: RIDUZIONE DELLE BARRIERE

5.1 Individuazione di cluster di variabili

Come è già stato messo in evidenza nella Sezione 4.1 le venti barriere proposte hanno ricevuto valutazioni eterogenee. Ricordiamo che (Tabella 2) vi sono tre affermazioni rispetto alle quali più della metà degli intervistati ha dichiarato di essere completamente d’accordo, ovvero che è difficile utilizzare l’auto elettrica su distanze lunghe a causa della scarsa presenza di stazioni di ricarica in autostrada, che attualmente il numero delle colonnine è ancora troppo basso e che il prezzo delle auto elettriche è ancora troppo elevato. A fronte di questi elementi di forte scetticismo, ci sono anche aspetti delle auto elettriche che molti rispondenti sembrano apprezzare. Infatti, più della metà degli intervistati si sentono sicuri nell’utilizzare un’auto elettrica nonostante la presenza di una batteria di elevate dimensioni (che potrebbe far pensare ad un rischio di incendio) Più del 50% si fida delle nuove tecnologie su cui si basano le auto elettriche, non è d’accordo sul fatto che tali auto abbiano un’accelerazione insufficiente e che non siano in grado di fornire un piacere di guida.

Questo tipo di evidenza ci ha suggerito di ricercare raggruppamenti di variabili con comportamenti simili, obiettivo che abbiamo perseguito realizzando una *cluster analysis* tra di esse, mediante il software R ed il pacchetto *ClustofVar* (Chavent et al., 2012). Tra le diverse possibilità offerte dal pacchetto abbiamo optato per la realizzazione di un raggruppamento gerarchico tra le variabili (comando *hclustervar*). Questo può essere usato sia per variabili di natura quantitativa sia per quelle di natura qualitativa o per un mix delle due ed il criterio di aggregazione è dato dalla diminuzione del grado di omogeneità per i cluster che vengono uniti. I risultati dell’aggregazione sono riportati nel dendrogramma proposto in Figura 1.

L’osservazione del grafico si può prestare a diverse interpretazioni ed a una diversa individuazione del numero di cluster di variabili, in base all’altezza (*height*, in inglese, e riportato sulla parte sinistra della figura) alla quale si sceglie di procedere alla sezione. Abbiamo individuato i sette *cluster* di variabili che riportiamo qui di seguito. Il primo comprende le barriere relative ai vantaggi ambientali ed allo smaltimento della batteria. Il secondo cluster comprende barriere che non sono rilevate come tali dalla maggior parte de-

Figura 1 – Dendrogramma per i cluster di variabili

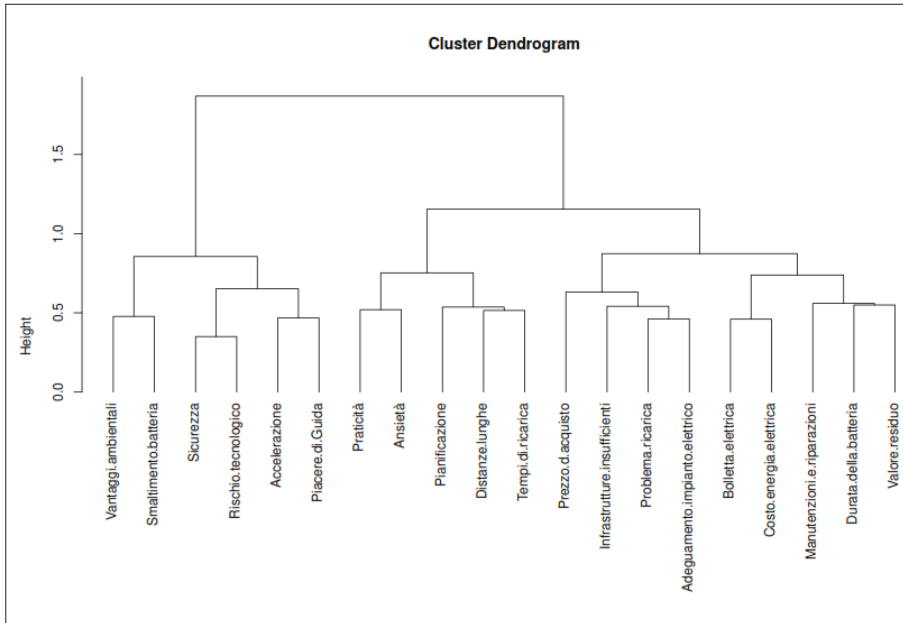
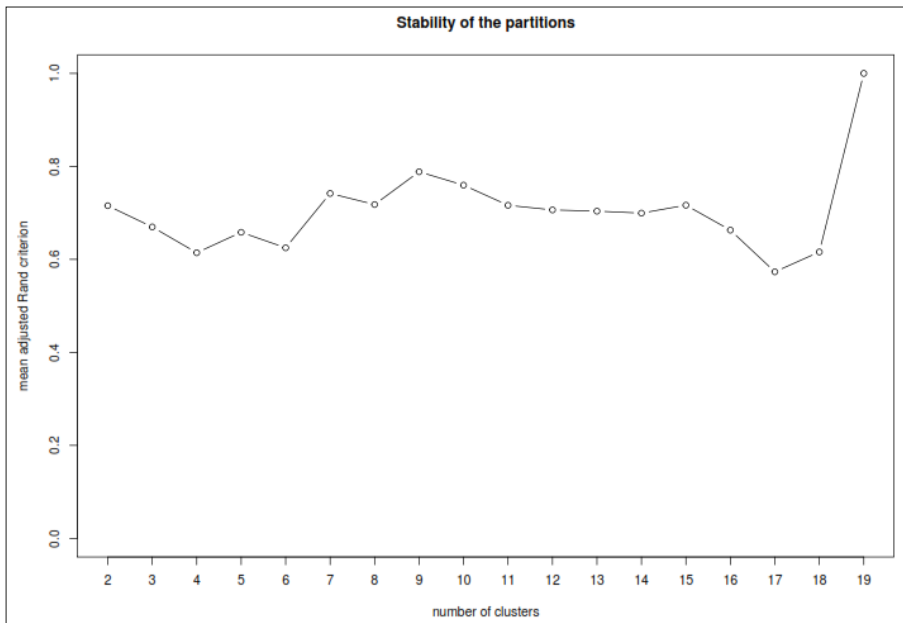


Figura 2 – Stabilità delle partizioni per i cluster di variabili



gli intervistati come evidenziato dalla Tabella 1. Si tratta della sicurezza, del rischio tecnologico, dell'accelerazione e del piacere di guida. Il terzo cluster è costituito da praticità ed ansietà, mentre il quarto comprende pianificazione, distanze lunghe e tempi di ricarica, tre aspetti che sono espressione abbastanza prossima di un vincolo all'utilizzo. Il quinto cluster identifica una dimensione eterogenea che accoglie il prezzo d'acquisto, le infrastrutture insufficienti, il problema della ricarica e l'adeguamento dell'impianto elettrico, accumulati, prezzo escluso, dalla rilevanza della dimensione tecnica dello strumento per la ricarica. Il sesto cluster è costituito da due barriere che sono coerentemente molto vicine, e che riguardano da un lato le preoccupazioni per un incremento dei costi in bolletta derivanti dalla ricarica e, dall'altro, i timori legati ad un incremento del prezzo dell'energia elettrica derivante da un possibile massiccio passaggio alla mobilità elettrica. Infine, un ultimo settimo cluster, che ha una dimensione economica come il precedente, raccoglie elementi di incertezza legati al valore residuo di un'auto elettrica nel futuro, l'impossibilità di trovare meccanici preparati e la vita utile della batteria, il componente più caro dell'auto.

Il raggruppamento delle variabili in sette distinti cluster è ben supportata dall'analisi della stabilità delle partizioni realizzate con il cluster gerarchico utilizzato. In particolare, lo studio della stabilità consente di comparare le partizioni ottenute (con un approccio bootstrap) rispetto alle partizioni proposte dall'iniziale risultato dell'analisi gerarchica. Successivamente, la media degli indici di Rand aggiustati è disegnata in base al numero di cluster, come riportato in Figura 2.

Sebbene il valore più alto dell'indice Rand (che varia tra 0 ed 1) sia ottenuto in corrispondenza di 19 clusters (rispetto a 20 variabili inserite), possiamo notare che un apprezzabile valore è rilevabile in corrispondenza di 7 cluster. Se la nostra scelta si limita a considerare questo numero di raggruppamenti possiamo dirci soddisfatti per il risultato di sintesi conseguito.

5.2 *Riduzione delle variabili: analisi dei componenti principali*

In modo simile a quanto realizzato nella Sezione precedente, il nostro obiettivo è anche qui quello di cercare di ridurre il numero di barriere ipotizzate. Per far ciò utilizziamo l'analisi delle componenti principali (ACP), che verrà applicata a 16 delle 20 variabili che identificano le barriere. Come infatti riportato nella Sezione 4.1, quattro barriere non vengono considerate tali da più della metà del campione. Nella Sezione 5.1. viene confermato questo risultato. Pertanto, in analogia a quanto fatto da Berkeley et al. (2018), abbiamo deciso di escluderle

dall'analisi. Si tratta delle barriere relative alla sicurezza, tecnologia, accelerazione e piacere di guida.

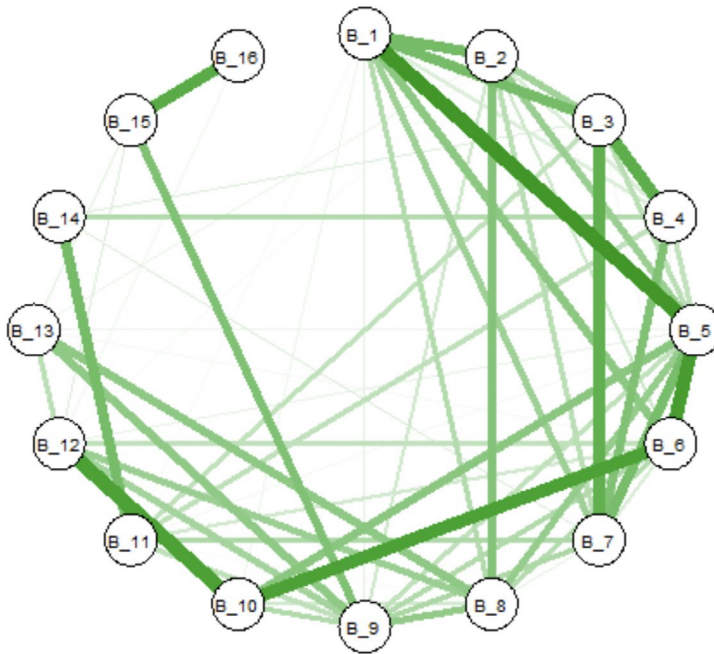
I dati su cui realizzeremo l'ACP sono relativi alla valutazione delle barriere e sono misurati su scala ordinale (Likert che va da 1 a 4). Le componenti principali vengono calcolate in questo caso sulla base della matrice delle correlazioni policorica.¹¹ Kolenikov e Angeles (2009) hanno dimostrato che tale metodo determina il valore più alto della varianza totale spiegata se confrontato con le simulazioni ottenute sull'ACP basate su altre varianti dell'ACP.

La Figura 3 rappresenta i valori delle correlazioni policoriche tra le barriere. Le linee uniscono le variabili correlate quando il valore della correlazione policorica è almeno pari a 0,4. Lo spessore delle linee cresce al crescere della correlazione. Alcune di esse sono degne di nota perché più elevate, anche se non superiori a 0,65. Si tratta delle correlazioni tra colonnine insufficienti e problema ricarica, tra problema ricarica e adeguamento impianto elettrico, tra adeguamento impianto elettrico e bolletta elettrica, e tra bolletta elettrica e costo energia elettrica. Una correlazione di minore intensità, ma comunque di livello apprezzabile è espressa tra le distanze lunghe ed i tempi di ricarica. Interessante è anche notare come la barriera vantaggi ambientali sia isolata rispetto al resto delle barriere, ad eccezione del legame con la barriera smaltimento della batteria. I legami sopra evidenziati sembrano essere coerenti con quanto descritto finora nelle Sezioni precedenti.

La Tabella 4 contiene gli autovalori. Si può notare che la percentuale di varianza totale spiegata dai primi due è pari al 54,9% e con il terzo si arriva al 62,6%. Per la scelta del numero di componenti ci siamo affidati a vari criteri. In base al criterio di Kaiser siamo portati a scegliere un numero di componenti pari a tre (autovalori maggiori di uno), mentre dall'esame dello *screenplot* dovremmo sceglierne due. Abbiamo deciso di considerarne due (54,9% di varianza spiegata) anche sulla base del criterio che suggerisce di considerare un numero di componenti che tenga conto di una percentuale sufficientemente elevata della varianza totale. Poiché al crescere del numero delle variabili aumenta la varianza totale, può essere ragionevole accontentarsi anche di una percentuale di varianza spiegata che sia comunque superiore ad una soglia

¹¹ "I dati sono all'origine rilevati su scale ordinali; tuttavia si può assumere ragionevolmente che la proprietà rilevata sia per sua natura continua. Questo approccio, noto come *underlying variable approach* (Kampen e Swyngendouw, 2000), può essere seguito da chi analizza scale quasi-cardinali, come capita per esempio nella misura degli atteggiamenti. Il coefficiente adatto può essere anche in questo caso la correlazione per ranghi di Spearman; tuttavia, se è plausibile assumere che il continuum sottostante a ogni rilevazione ordinale sia distribuito normalmente, la misura di concordanza più appropriata è il coefficiente di correlazione policorica, se entrambe le variabili osservate sono ordinali, oppure la correlazione poliserialia, nel caso che una di esse sia una variabile continua (Jöreskog e Sörbom, 1986)." (Albano, 2004, p. 24)

Figura 3. Legami tra barriere all'interno della matrice di correlazione policorica



Legenda

B_1	Colonnine insufficienti	B_9	Durata della batteria
B_2	Prezzo	B_10	Bolletta elettrica
B_3	Distanze lunghe	B_11	Praticità
B_4	Pianificazione	B_12	Costo energia elettrica
B_5	Problema ricarica	B_13	Valore residuo
B_6	Adeguamento impianto elettrico	B_14	Ansietà
B_7	Tempi di ricarica	B_15	Smaltimento batteria
B_8	Riparazioni e manutenzioni	B_16	Vantaggi ambientali

minima, come suggerito da Zani e Cerioli (2017, p. 238), pari, nel nostro caso a 39,72%.

Le due componenti estratte vengono interpretate sulla base della Tabella 5.

La tabella evidenzia una maggiore correlazione positiva tra tutte le barriere, esclusi i vantaggi ambientali, e la prima componente. Essa può essere interpretata come una componente che cattura una generale avversione nei confronti dell'auto elettrica, percezione che è coerente a numerosi esercizi di preferenza dichiarata realizzati per l'Italia (Valeri e Danielis, 2015; Giansoldati et al., 2018). Diversamente, la seconda componente risulta essere maggiormente correlata positivamente con i vantaggi ambientali e può essere quindi interpretata come preoccupazione ambientale, tenendo conto anche della correlazione abbastanza elevata con lo smaltimento della batteria.

Tabella 4 - Varianza totale spiegata

k	AUTOVALORI	% DI VARIANZA	% DI VARIANZA CUMULATA
1	7.148884	44.7%	44.7%
2	1.635755	10.2%	54.9%
3	1.230306	7.7%	62.6%
4	0.814223	5.1%	67.7%
5	0.687173	4.3%	72.0%
6	0.56249	3.5%	75.5%
7	0.537256	3.4%	78.9%
8	0.473838	3.0%	81.8%
9	0.462954	2.9%	84.7%
10	0.439601	2.7%	87.5%
11	0.400582	2.5%	90.0%
12	0.378704	2.4%	92.3%
13	0.342569	2.1%	94.5%
14	0.329342	2.1%	96.5%
15	0.293857	1.8%	98.4%
16	0.262466	1.6%	100.0%

Tabella 5 – Coefficienti di correlazione tra le variabili e le componenti estratte

BARRIERE	COMPONENTE 1	COMPONENTE 2
Colonnine insufficienti	0.6943042	-0.393260
Prezzo d'acquisto	0.6901486	-0.196438
Distanze lunghe	0.6616820	-0.439982
Pianificazione	0.6351324	-0.362452
Problema ricarica	0.7571040	-0.217817
Adeguamento impianto elettrico	0.7293044	-0.076817
Tempo di ricarica	0.7215377	-0.217257
Manutenzioni e riparazioni	0.7061890	0.056573
Durata della batteria	0.7422513	0.241246
Bolletta elettrica	0.6723232	0.154836
Praticità	0.6842310	-0.043583
Costo energia elettrica	0.6612158	0.383221
Valore residuo	0.6472346	0.307575
Ansietà	0.6024286	-0.055235
Smaltimento della batteria	0.5673862	0.536207
Vantaggi ambientali	0.4613019	0.630642

6. INDIVIDUAZIONE DI CLUSTER DI INDIVIDUI: ESISTONO TIPOLOGIE DI INDIVIDUI CON COMPORTAMENTI SIMILI?

Un utile strumento per comprendere se vi sono elementi di similarità tra i soggetti intervistati in base ai punteggi forniti rispetto alle ipotizzate barriere all'acquisto dell'auto elettrica è dato dalla *cluster analysis*. Per l'individuazione dei gruppi si è scelto di utilizzare le prime tre componenti principali dell'analisi che risultano nella Sezione precedente e che spiegano il 62,6% della varianza totale. Poiché il numero di casi è elevato si è optato per un metodo non gerarchico, utilizzando in particolare, quello della *k-means*, algoritmo che richiede venga fissato a priori il numero dei gruppi (*g*). La scelta del numero dei gruppi è stata effettuata ripetendo più volte l'analisi con valori diversi di *g*. La valutazione della partizione migliore è stata ottenuta utilizzando l'indice R^2 (Zani e Cerioli, 2004). La scelta è caduta su una partizione in quattro gruppi che risultano essere ben

interpretabili. Il primo cluster (CL2) è composto da 201 intervistati, il secondo cluster (CL3) da 245, il terzo cluster (CL4) da 215 e il quarto cluster (CL1) da 209. La Tabella 6 consente di descrivere ciascun cluster sulla base delle valutazioni medie date alle barriere dagli appartenenti al cluster stesso.

Tabella 6 – Livelli medi di valutazione delle barriere secondo cluster di individui

BARRIERE	CL2 AVVERSI	CL3 PERPLESSI	CL4 INCERTI	CL1 FAVOREVOLI
Praticità	3.51	2.59	2.92	2.58
Pianificazione	3.76	2.97	3.60	2.71
Ansietà	3.42	2.23	2.86	2.48
Distanze lunghe	3.82	3.27	3.73	2.79
Tempo di ricarica	3.71	2.98	3.27	2.65
Problema ricarica	3.70	3.46	3.17	2.54
Colonnine insufficienti	3.80	3.67	3.59	2.64
Adeguamento impianto elettrico	3.63	3.45	2.88	2.55
Bolletta elettrica	3.47	3.28	2.32	2.47
Vantaggi ambientali	3.34	1.97	1.95	2.80
Smaltimento della batteria	3.51	2.41	2.21	2.79
Durata della batteria	3.68	2.99	2.67	2.78
Prezzo d'acquisto	3.79	3.59	3.42	2.84
Costo energia elettrica	3.46	3.12	2.11	2.60
Valore residuo	3.44	2.79	2.37	2.60
Manutenzioni e riparazioni	3.56	3.20	2.77	2.52
Numero individui	201	245	215	209

Legenda colori

	barriera percepita molto
	barriera percepita abbastanza
	barriera percepita poco
	barriera percepita niente

Si può individuare un cluster (CL2) formato da individui mediamente *aversi* all'auto elettrica: questi soggetti sono, in media, molto d'accordo nel considerare come barriere tutte quelle presentate. Rispetto agli altri cluster hanno un'età media più elevata, dichiarano un livello di conoscenza delle auto elettrica più basso, sono prevalentemente donne, e la percentuale di iscritti ad associazione ambientaliste è la più bassa. Il secondo cluster (CL3) è costituito da individui che abbiamo definito come *perplexi*. Si tratta di persone che sono abbastanza d'accordo nel considerare barriere quelle relative alle infrastrutture ed ai costi. Rispetto agli altri cluster, gli individui che lo compongono hanno redditi tendenzialmente più bassi, la percentuale di coloro che ha già guidato un'auto elettrica è la più bassa, e vi è una minore incidenza di imprenditori e dipendenti dirigenti. Il terzo cluster (CL4) è costituito da individui che abbiamo definito come *incerti*, che sono abbastanza d'accordo sulla presenza di barriere legate all'utilizzabilità. In questo cluster la percentuale di soggetti con titolo di studio superiore al diploma è maggiore rispetto altri, così come la quota di imprenditori e dipendenti dirigenti, e di persone con redditi più alti. Il quarto cluster (CL1) è formato da individui che abbiamo definito *favorevoli*, perché in media non avvertono barriere verso l'auto elettrica o molto poco (ansietà, durata della batteria e prezzo), mentre sono abbastanza preoccupati dei risvolti ambientali (vantaggi ambientali e smaltimento batteria). Rispetto agli altri cluster, si tratta di persone in media più giovani, con il più alto livello dichiarato di conoscenza, in cui la presenza maschile è più alta, e in cui è anche maggiore la percentuale di coloro che ha provato l'auto elettrica e anche di coloro che fanno parte di associazioni ambientaliste.

7. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI PER IL DECISORE PUBBLICO

Perseguire l'obiettivo di una progressiva decarbonizzazione dei trasporti impone la transizione verso una mobilità sempre più sostenibile, in cui è determinante favorire una sempre maggiore diffusione delle auto elettriche che, in fase d'uso, non danno vita ad alcun tipo di emissione inquinante. Il nostro Paese, purtroppo, si caratterizza però per un livello molto basso di diffusione di mezzi mossi da questa tecnologia, fenomeno determinato da una pluralità di ostacoli sui quali il presente contributo ha cercato di far luce, studiando il punto di vista del potenziale consumatore. Crediamo, infatti, che sia interesse non solo puramente accademico, ma anche del decisore pubblico e delle case produttrici di autoveicoli, comprendere quali sono i principali ostacoli che il cittadino italiano dichiara quando è posto di fronte alla possibilità di scegliere un'auto puramente elettrica.

I risultati del nostro lavoro, sebbene di natura descrittiva, hanno evidenziato alcuni elementi salienti che giustificano il finora limitato successo delle auto elettriche. Considerando il punteggio medio attribuito alle singole barriere come misura sintetica della loro intensità, emerge come i principali ostacoli siano dati 1) da un'insufficiente densità delle colonnine di ricarica, 2) dalla necessità di pianificare con cura i propri viaggi, soprattutto quelli più lunghi che usualmente vengono realizzati in autostrada, e 3) dall'ancora elevato prezzo di acquisto. Allo stesso tempo però registriamo che i rispondenti non percepiscono l'auto elettrica come un mezzo poco sicuro, non sono spaventati dalla tecnologia su cui si basa, e ripongono fiducia nelle loro performance in termini di accelerazione e piacere di guida. Si tratta di elementi che lasciano pensare vi siano margini di accettazione dell'auto elettrica non certo del tutto consolidati, ma che forniscono un margine di sensibile ottimismo.

Tali valutazioni di sintesi celano una notevole eterogeneità nelle valutazioni fornite dai rispondenti, che mutano in base alle caratteristiche socio-economiche dell'individuo. Infatti l'analisi attraverso il test Chi-quadro ha evidenziato che i soggetti di sesso maschile, quelli con un livello di istruzione più elevato, quelli con un reddito alto, coloro che hanno un buon livello di conoscenza delle auto elettriche, chi ha avuto un'esperienza di guida, chi ha partecipato ad un'associazione ambientalista e chi manifesta preoccupazione per la situazione ambientale del luogo in cui vive percepisce le barriere all'acquisto di un'auto elettrica in modo meno opprimente rispetto a soggetti con caratteristiche diverse.

Abbiamo fatto uso dello strumento della *cluster analysis* sulle variabili, individuando sette gruppi di variabili con caratteristiche simili. Ci siamo quindi avvalsi dell'ACP ed abbiamo identificato due componenti principali, una che descrive la generale avversione dei rispondenti rispetto all'auto elettrica, ed una espressione della preoccupazione sugli effetti benefici derivanti dall'uso dell'auto elettrica per effetto di un mix energetico che include non solo fonti rinnovabili. Sulla base dei risultati dell'ACP abbiamo altresì realizzato una *cluster analysis* sugli individui che ci ha consentito di individuare quattro gruppi, caratterizzati da diversi atteggiamenti nei confronti dell'auto elettrica, gli *avversi*, i *perplexi*, gli *incerti* ed i *favorevoli*. Ci riproponiamo di ripetere lo studio utilizzando l'analisi delle corrispondenze multiple facendo cadere l'ipotesi che ci sia equidistanza tra i livelli della scala di Likert.

I risultati conseguiti sono utili per il decisore pubblico e le case automobilistiche. La pubblica amministrazione trova conferma dell'importanza delle misure già esistenti per l'abbattimento del costo d'acquisto, come l'Ecobonus, previsto a livello nazionale, ma anche delle misure cumulabili eventualmente previste da alcune Regioni. Il decisore pubblico constata anche come il campione percepisca l'infrastrutturazione di ricarica ancora in uno stadio embrionale, sebbe-

ne soggetti pubblici e privati stiano dialogando con efficacia per un suo forte rafforzamento, come nel caso delle rete di Enel X. L'amministrazione centrale e periferica è però anche chiamata ad uno sforzo di tipo informativo, al fine di educare i potenziali acquirenti dell'auto elettrica ad una comprensione profonda delle caratteristiche tecniche del veicolo ed ai potenziali risparmi di costo di cui il possessore può beneficiare rispetto ad un veicolo endotermico. È altresì ovvia e auspicabile un'azione divulgativa dei benefici effettivi sull'ambiente dell'adozione dell'auto elettrica non solo in fase d'uso, ma lungo tutto il suo ciclo di vita. Le case produttrici di autoveicoli possono utilizzare le informazioni che emergono da questa indagine esplorativa per comprendere come segmentare il mercato al fine di favorire una maggiore diffusione dei propri modelli elettrici, qualora questo rappresenti un obiettivo strategico. Riteniamo, altresì, che le case produttrici siano chiamate, in modo simile al decisore pubblico, ad attivarsi con maggior vigore per divulgare le modalità e le conseguenze di una transizione verso la mobilità elettrica. Ciò si può tradurre in un'opportunità di tipo commerciale, ma può anche condurre ad un'esternalità positiva per la collettività, con le case produttrici che attraverso gli strumenti della pubblicità, in particolare nei social media, possono rendere sempre più familiare, e quindi meno preoccupante, un processo di evoluzione tecnologica assimilabile a quelli a cui l'uomo si è sempre più abituato negli ultimi decenni.

- ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) (2019), New passenger car registrations by fuel type in the European Union, (dati disponibili alla seguente URL: https://www.acea.be/uploads/press_releases_files/20191107_PRPC_fuel_Q3_2019_FINAL.xlsx)
- Albano, R. (2004). *Introduzione all'analisi fattoriale per la ricerca sociale*.
- Axsen, J., & Kurani, K. S. (2013). Hybrid, plug-in hybrid, or electric—What do car buyers want?. *Energy Policy*, *61*, 532-543.
- Axsen, J., Orlebar, C., & Skippon, S. (2013). Social influence and consumer preference formation for pro-environmental technology: The case of a UK workplace electric-vehicle study. *Ecological Economics*, *95*, 96-107.
- Berkeley, N., Jarvis, D., & Jones, A. (2018). Analysing the take up of battery electric vehicles: An investigation of barriers amongst drivers in the UK. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *63*, 466-481.
- Bireselioglu, M. E., Kaplan, M. D., & Yilmaz, B. K. (2018). Electric mobility in Europe: A comprehensive review of motivators and barriers in decision making processes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *109*, 1-13.
- Browne, D., O'Mahony, M., & Caulfield, B. (2012). How should barriers to alternative fuels and vehicles be classified and potential policies to promote innovative technologies be evaluated?. *Journal of Cleaner Production*, *35*, 140-151.
- Carley, S., Krause, R. M., Lane, B. W., & Graham, J. D. (2013). Intent to purchase a plug-in electric vehicle: A survey of early impressions in large US cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *18*, 39-45.
- Chavent, M., Kuentz, V., Liqueur, B., & Saracco, L. (2011). ClustOfVar: an R package for the clustering of variables. *arXiv preprint arXiv:1112.0295*.
- 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.
- Daziano, R. A., & Chiew, E. (2013). On the effect of the prior of Bayes estimators of the willingness to pay for electric-vehicle driving range. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *21*, 7-13.
- Diamond, D. (2009). The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from US states. *Energy Policy*, *37*(3), 972-983.
- Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy policy*, *48*, 717-729.
- 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., Scorrano M., Danielis (2019a), Does car expertise influence the choice of electric cars? Evidence from a hybrid choice model in

- Italy, *mimeo*, Università degli Studi di Trieste.
- Giansoldati M., Rotaris L., Scorrano M., Danielis R. (2019b), The role of knowledge and environmental concern on electric car choice. A comparative experiment between Italy and Slovenia, *mimeo*, Università degli Studi di Trieste.
- Giansoldati M., Rotaris L., Scorrano M., Danielis R. (2019c), Evidence on the consumers' preferences for electric cars in Italy. A discrete choice model with technological and policy scenarios, *mimeo*, Università degli Studi di Trieste.
- Graham-Rowe, E., Gardner, B., Abraham, C., Skippon, S., Dittmar, H., Hutchins, R., & Stannard, J. (2012). Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(1), 140-153.
- Haustein, S., & Jensen, A. F. (2018). Factors of electric vehicle adoption: A comparison of conventional and electric car users based on an extended theory of planned behavior. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(7), 484-496.
- Heffner, R. R., Kurani, K. S., & Turrentine, T. S. (2007). Symbolism in California's early market for hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(6), 396-413.
- Jensen, A. F., Cherchi, E., & Mabit, S. L. (2013). On the stability of preferences and attitudes before and after experiencing an electric vehicle. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 24-32.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (2019), *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2017. National Inventory Report 2019*, Roma (disponibile alla seguente URL: http://www.isprambiente.gov.it/files2019/pubblicazioni/rapporti/R_307_19_NIR2019.pdf)
- Kampen, J., & Swyngedouw, M. (2000). The ordinal controversy revisited. *Quality and quantity*, 34(1), 87-102.
- Kolenikov, S., & Angeles, G. (2009). Socioeconomic status measurement with discrete proxy variables: Is principal component analysis a reliable answer?. *Review of Income and Wealth*, 55(1), 128-165.
- Lane, B., & Potter, S. (2007). The adoption of cleaner vehicles in the UK: exploring the consumer attitude-action gap. *Journal of cleaner production*, 15(11-12), 1085-1092.
- Lévay, P. Z., Drossinos, Y., & Thiel, C. (2017). The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership. *Energy Policy*, 105, 524-533.
- National Research Council. (2015). *Overcoming barriers to deployment of plug-in electric vehicles*. National Academies Press.
- Palmer, K., Tate, J. E., Wadud, Z., & Nellthorp, J. (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. *Applied energy*, 209, 108-119.
- Priessner, A., Sposato, R., & Hampl, N. (2018). Predictors of electric vehicle adoption: An analysis of potential electric vehicle drivers in Austria. *Energy policy*, 122, 701-714.
- Scorrano M., Danielis R., Giansoldati M. (2019a), Dissecting the total cost of ownership of electric cars: the impact of vehicle use intensity, home charging and urban driving, *mimeo*, Università degli Studi di Trieste.
- Scorrano M., Danielis R., Giansoldati M. (2019b), 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*, Vol. xlvi, no. 3, November.
- Scorrano M., Danielis R., Giansoldati (2019c), Mandating the use of the electric taxis: the case of Florence, *mimeo*, Università degli Studi di Trieste.
- Scorrano M., Danielis R., Giansoldati M. (2019d), Electric light commercial vehicles for a cleaner urban goods distribution. Are they cost competitive?, *mimeo*, Università degli Studi di Trieste.
- Schmalfuß, F., Mühl, K., & Krems, J. F. (2017). Direct experience with battery electric vehicles (BEVs) matters when evaluating vehicle attributes, attitude and purchase intention. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 46, 47-69.
- She, Z. Y., Sun, Q., Ma, J. J., & Xie, B. C. (2017). What are the barriers to widespread adoption of battery electric vehicles? A survey of public perception in Tianjin, China. *Transport Policy*, 56, 29-40.

- Sörbom, D., & Jöreskog, K. G. (1995). *PRELIS: A program for multivariate data screening and data summarization: A preprocessor for LISREL*. Scientific Software International.
- Steinhilber, S., Wells, P., & Thankappan, S. (2013). Socio-technical inertia: Understanding the barriers to electric vehicles. *Energy policy*, *60*, 531-539.
- Todd, J., Chen, J., & Clogston, F. (2013). Creating the clean energy economy: Analysis of the electric vehicle industry. *International Economic Development Council, Washington, DC*.
- Valeri, E., & Danielis, R. (2015). Simulating the market penetration of cars with alternative fuel powertrain technologies in Italy. *Transport Policy*, *37*, 44-56.
- Wan, Z., Sperling, D., & Wang, Y. (2015). China's electric car frustrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *34*, 116-121.
- Zani, S., & Cerioli, A. (2007). *Analisi dei dati e data mining per le decisioni aziendali*, Giuffè Editore, Milano.

Esiste un mercato per gli scooter elettrici in Italia? Evidenze da un'indagine sulle preferenze dichiarate nella città di Trieste

MARIANGELA SCORRANO

1. INTRODUZIONE

Gli scooter¹ rappresentano una scelta sempre più diffusa per gli spostamenti nelle aree urbane, soprattutto ma non solo per i tradizionali tragitti da e per il lavoro. Le loro dimensioni, la grande maneggevolezza e la facilità di utilizzo li rendono particolarmente adatti soprattutto nelle grandi città, dove gli spazi destinati ai parcheggi sono sempre più limitati, e i livelli elevati di congestione del traffico rendono sempre più gravoso in termini di tempo raggiungere i luoghi di destinazione. Gli scooter, veloci, scattanti e facili da parcheggiare, efficienti nell'uso dello spazio, vengono quindi sempre più visti come valide alternative ad altri mezzi di trasporto, in primis l'automobile, anche per i costi di

¹ In questo lavoro utilizzeremo il termine scooter per indicare:

- a) i ciclomotori, ossia veicoli a due ruote (categoria L1) aventi una velocità massima per costruzione non superiore a 45 km/h e caratterizzati da un motore la cui cilindrata è inferiore o uguale a 50 cm³ se a combustione interna, oppure la cui potenza nominale continua massima è inferiore o uguale a 4 kW per i motori elettrici;
- b) i motocicli leggeri, ossia veicoli a due ruote muniti di un motore con cilindrata fino a 125 cm³ se a combustione interna oppure la cui potenza nominale continua massima è inferiore o uguale a 11 kW per i motori elettrici, aventi una velocità massima per costruzione superiore a 45 km/h.

acquisto e di gestione molto più contenuti, che li rendono un mezzo accessibile ed equo per tutte le fasce di età e di reddito. I numeri confermano questo trend, soprattutto in Italia, il Paese europeo con il più alto numero di motocicli immatricolati nel 2018 (219.694), secondo solo alla Francia se si considerano anche i ciclomotori (ACEM, 2019). Per contro, però, gli scooter sono molto rumorosi e soprattutto inquinanti. Le loro emissioni costituiscono il 30% dell'inquinamento veicolare, ma si tratta di emissioni particolarmente nocive, a causa dei gas incombusti sprigionati soprattutto dai motori a due tempi (Platt et al., 2014). A partire dal 1999, in ritardo di alcuni anni rispetto agli autoveicoli, l'Unione Europea ha emanato una direttiva di omologazione comunitaria dei veicoli a due ruote, che comprende anche dei protocolli specifici (Euro 1, 2, 3, 4) per il controllo e la riduzione dell'inquinamento ambientale, entrati in vigore gradualmente nel corso degli anni. A gennaio 2020 entrerà in vigore l'Euro 5 per tutti i ciclomotori e motocicli di nuova immatricolazione. Saranno introdotti limiti più stringenti sulle emissioni inquinanti e la diagnostica di bordo, volta a vigilare che le condizioni di stato d'uso del veicolo siano tali da poter garantire la dovuta efficienza in termini di emissioni inquinanti. Lo scopo ultimo è poter garantire un parco circolante più pulito e farlo durare più a lungo. Rendere più severi i criteri sulle emissioni significa aumentare significativamente la possibilità di raggiungere e superare gli obiettivi europei per l'ambiente fissati per il 2030. A questo scopo, un'ulteriore strategia chiave per puntare ad un sistema di trasporto sostenibile è rappresentata dall'uso di carburanti e sistemi di propulsione alternativi e rispettosi dell'ambiente (Tseng et al., 2013; Martos et al., 2016). In questo senso, gli scooter elettrici a batteria sembrano una valida soluzione. Essi, infatti, uniscono i vantaggi delle due ruote ad impatti ambientali puliti: sono privi di emissioni in fase d'uso e decisamente più silenziosi rispetto ai classici motori endotermici. Oltre a questi benefici sociali, possono accedere a zone a traffico limitato e godono di interessanti vantaggi privati. Beneficiano infatti di incentivi statali, sono esenti da tasse (bollo) per cinque anni e possono godere di sconti sul premio assicurativo che possono arrivare anche al 50%. La manutenzione di uno scooter elettrico è inoltre ridotta al minimo (le componenti meccaniche sono molto inferiori a quelle di uno scooter tradizionale) e i costi per la ricarica della batteria sono decisamente bassi ed inferiori a quelli dei carburanti tradizionali. Sono inoltre geolocalizzabili, con tutti i vantaggi che questo comporta. Per contro, i principali svantaggi sono rappresentati innanzitutto dal prezzo di acquisto, ancora molto più alto rispetto a quello dei motori a combustione interna, i limiti di autonomia e i tempi necessari per la ricarica. Tra questi, il prezzo di listino più alto rispetto agli scooter tradizionali sembra essere il maggiore ostacolo all'adozione degli scooter elettrici. I risparmi a lungo termine determinati dai costi operativi inferiori (Al-

lcott e Wozny, 2014; Krause et al., 2013) sembrano infatti essere sottostimati. Una metrica alternativa che un consumatore razionale dovrebbe considerare quando decide quale veicolo acquistare è rappresentata dal costo totale di possesso (TCO), che comprende tutti i costi, presenti e futuri, sostenuti durante il periodo di possesso del veicolo (Delucchi e Lipman, 2001). La stima del TCO, comunque, non è priva di difficoltà riguardanti la distinzione tra costi privati e sociali, l'incertezza connessa al futuro flusso di costi, l'impatto delle politiche normative e fiscali, e la natura specifica delle stime relativamente al veicolo, al paese e all'individuo considerati (Scorrano et al., 2019b). L'utilizzo del veicolo in contesti urbani e la possibilità di ricaricarlo privatamente a tariffe energetiche più contenute rispetto a quelle applicate ai punti di ricarica pubblici aumenta certamente la competitività in termini di costi dei veicoli elettrici rispetto a quelli endotermici (Scorrano et al., 2019a). L'utilizzo per la ricarica di energia rinnovabile generata all'interno di una microgrid connessa ad un impianto fotovoltaico, riduce ulteriormente l'LCOE (Levelized Cost of Electricity) e quindi il TCO di un veicolo elettrico (Massi Pavan et al., 2019). Queste considerazioni valgono a maggior ragione nel caso degli scooter elettrici. Contrariamente, infatti, alle auto elettriche che dipendono fortemente dalla disponibilità di un'adeguata infrastruttura di ricarica, sempre più i modelli di scooter elettrici in commercio hanno batterie estraibili, che possono essere ricaricate comodamente a casa o in ufficio alla normale presa domestica. La dipendenza dalle stazioni di ricarica può quindi essere notevolmente ridotta, azzerando di fatto i limiti propri di chi non dispone di un garage in cui poter ricaricare il veicolo elettrico. Inoltre, la società Gogoro ha sviluppato pacchi batteria sostituibili in una rete di punti di ricarica sparsi per Taiwan e presto espanderà tale tecnologia anche in Europa, dove il servizio è già presente. L'obiettivo di Gogoro è creare una rete capillare di accumulatori condividendola anche con altri marchi, puntando sulla standardizzazione delle batterie che permetterà un rifornimento molto più rapido: il motto è "paga, scambia, parti". Pertanto, se l'auto elettrica incontra limiti in città e soprattutto nelle grandi città, a causa dei pochi punti di ricarica, di un tipo di abitazioni che non prevede garage e non consente quindi l'installazione di wallbox, lo scooter elettrico trova la sua ragione d'esistere proprio nell'ambiente cittadino.

Guardando al mercato europeo, i numeri confermano un trend positivo: in Europa le immatricolazioni di scooter elettrici sono cresciute da 9.043 nel 2011 a 47.179 nel 2018 (ACEM, 2019). La Francia guida la classifica con 11.907 immatricolazioni nel 2018, seguita da Belgio (10.431), Olanda (8.547) e Spagna (6.422). L'Italia occupa la quinta posizione con 3.473 immatricolazioni, gran parte delle quali (2.851) rappresentate da ciclomotori, grazie soprattutto alle flotte dedicate allo *scooter sharing*. Questo trend positivo continua a registrarsi anche

nei primi sei mesi del 2019, con un aumento del 74% e dell'83% delle immatricolazioni di ciclomotori e motocicli elettrici, rispettivamente, rispetto allo stesso periodo del 2018. Guardando alla quota di mercato in Italia degli elettrici (% di scooter elettrici rispetto al totale – elettrici più endotermici – sul mercato), però, emerge che, seppur crescente, essa arriva nel 2018 solo all'1.44%, pertanto la penetrazione nel mercato è ancora limitata.

In Cina, secondo mercato globale dopo quello indiano, le decisioni del governo influenzano pesantemente le abitudini di mobilità della popolazione, attraverso normative molto restrittive sulle emissioni, con limitazioni o divieti alla circolazione di veicoli ad alimentazione tradizionale e politiche volte a favorire sia la domanda che l'offerta di veicoli a zero emissioni. In Europa, al contrario, la scelta del mezzo di trasporto da utilizzare dipende da decisioni individuali. È pertanto importante studiare il comportamento e le intenzioni di acquisto del consumatore; ovvero, i fattori, i driver e gli ostacoli all'adozione degli scooter elettrici, tema non diffusamente studiato in letteratura (per una review si veda Eccarius e Lu (2019)), o analizzato con riferimento tipicamente al mercato asiatico (Huang et al., 2018; Guerra, 2017; Jones et al., 2013).

Obiettivo del paper è quello di cercare di comprendere le motivazioni alla base dell'ancora scarsa diffusione degli scooter elettrici in Italia e di valutarne le prospettive di mercato sulla base di un'indagine di preferenza dichiarata. Le domande di ricerca a cui si cercherà di rispondere sono:

- qual è il grado di conoscenza degli scooter elettrici;
- quali sono i principali attributi che influenzano la scelta di uno scooter;
- come cambia la probabilità di scelta dello scooter elettrico rispetto ad uno a benzina tra individui con un diverso livello di conoscenza dello scooter, con una precedente esperienza di guida con uno scooter elettrico, o con una diversa sensibilità ai temi ambientali.

Le stime ottenute permetteranno poi di valutare l'impatto che l'introduzione di misure incentivanti (sussidi all'acquisto) o miglioramenti tecnologici (in termini di autonomia) possono avere sul grado di diffusione degli scooter elettrici in Italia.

Il lavoro si focalizza sul caso studio di Trieste, dove si registra una concentrazione di motocicli elevata rispetto alla media nazionale: un residente ogni 5 dispone di una moto o di uno scooter, e nel capoluogo regionale viene immatricolato il 30% del totale in Friuli Venezia Giulia.

2. I MODELLI A SCELTA DISCRETA

I modelli a scelta discreta basati su indagini sulle preferenze dichiarate (McFadden, 1981) permettono di descrivere, comprendere e predire le decisioni degli operatori quando l'insieme di scelta all'interno del quale l'individuo è chiamato ad esprimere la propria preferenza è rappresentato da alternative numerabili, finite e che si escludono a vicenda (Marcucci, 2015).

Adottando la teoria microeconomica delle scelte del consumatore, l'individuo razionale sarà portato a selezionare l'alternativa che, tra le tante a disposizione, gli garantirà il raggiungimento della massima utilità possibile. L'utilità reale, tuttavia, rimane non osservabile, non essendo possibile per l'analista identificare tutti gli aspetti che condizionano la scelta del consumatore. L'utilità U_{in} associata alla scelta dell' i -esimo prodotto, tra le alternative disponibili, relativamente all' n -esimo consumatore, pertanto, può essere espressa come somma di una componente osservabile e di una componente non osservabile:

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} = \beta'_{in} \cdot x_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

dove V_{ij} rappresenta quella porzione di utilità direttamente osservabile, detta anche deterministica, sistemica o rappresentativa, determinata dalle caratteristiche individuali dell' n -esimo consumatore nonché dalle caratteristiche degli attributi dell' i -esimo bene/servizio selezionato (x_{in} è il vettore delle variabili indipendenti; β_n il vettore dei coefficienti delle variabili indipendenti); ε_{in} rappresenta quella parte di utilità stocastica non direttamente spiegabile dal ricercatore.

A partire da tale presupposto e secondo quanto ipotizzato dalla Random Utility Theory, la probabilità che un determinato prodotto venga preferito rispetto alle altre alternative disponibili è tanto maggiore quanto maggiore è l'utilità che il suo acquisto e la sua adozione sono in grado di garantire. Più specificatamente, la probabilità di scegliere l'alternativa i viene definita pari alla probabilità che l'utilità dell'alternativa i sia maggiore o uguale all'utilità delle altre alternative presenti nell'insieme di scelta C dell'individuo n :

$$\Pr(i|C_n) = \Pr[U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n] \quad (2)$$

Definendo l'utilità in termini di attributi caratterizzanti le alternative di beni/servizi (Lancaster, 1966), la disaggregazione di un bene/servizio nei singoli attributi che lo costituiscono consente di cogliere i trade off che il consumatore

è chiamato ad affrontare al momento della scelta. Se, tra gli attributi considerati, si include anche il prezzo, tale tecnica permette di calcolare la Marginal Willingness to Pay (disponibilità a pagare marginale).

La distribuzione del termine di errore in (1) definisce il modello di scelta. Tradizionalmente i dati raccolti negli esperimenti di scelta sono analizzati impiegando il modello di Mc Fadden (1974) Multinomial Logit (MNL), in cui si assume che ogni ε sia indipendente e identicamente distribuito (IID) secondo una variabile detta Gumbel a media nulla e parametro θ , in base alla quale la funzione di probabilità ha una forma chiusa. È possibile quindi utilizzare il metodo tradizionale della massima verosimiglianza per la stima dei coefficienti β della formula (Train, 2009). Questi parametri permettono di analizzare come gli intervistati valutino relativamente i diversi attributi (il trade off fra attributi). I modelli Logit Multinomiali, tuttavia, presentano una serie di limitazioni molto restrittive dovute a tre assunzioni principali su cui si basano: (1) indipendenza delle alternative irrilevanti (IIA) che implica proporzionale sostituibilità tra le alternative; in altri termini il rapporto delle probabilità di scelta è indipendente dalla presenza o dall'assenza di altre alternative nell'insieme di scelta; (2) assunzione di omogeneità delle preferenze nel campione; i parametri β degli attributi del prodotto sono quindi assunti come costanti all'interno della popolazione (Ben-Akiva e Lerman, 1985); differenze possono essere catturate solo tramite l'analisi delle variabili osservate, quindi differenziando il campione sulla base delle caratteristiche socio-economiche individuali; (3) assunzione di indipendenza dei fattori stocastici tra scelte da parte dello stesso individuo (scelte ripetute); quando agli individui viene chiesto di effettuare diversi esperimenti di scelta in modo da raccogliere per ognuno molti più dati, ciascuna situazione di scelta diventa un'osservazione del dataset. Per poter superare queste limitazioni sono stati sviluppati modelli più flessibili che si basano su assunzioni meno restrittive, innanzitutto al fine di migliorare la comprensione del comportamento degli attori economici. I modelli a parametri casuali (Mixed Logit), ad esempio, permettono di tener conto dell'eterogeneità latente tra individui ignorata nei modelli Logit Multinomiali, catturando quei gusti che non vengono espressi nelle variabili osservate o che sono semplicemente casuali. In tali modelli, quindi, vengono introdotti *disturbi flessibili* per permettere una più complessa struttura delle covarianze; i parametri dunque variano fra individui invece di rimanere fissi come in un Logit standard.

La creazione di una indagine sulle preferenze dichiarate consiste in tre fasi principali:

- 1) specificazione del modello; in questa fase vengono definite le alternative (ipotetiche) che descrivono verosimilmente l'oggetto di studio e tra le quali

il rispondente è chiamato a fare una scelta. Ogni alternativa è definita da una serie di attributi che, a loro volta, sono specificati da un insieme di livelli, definiti a partire dalla costruzione di un *design* sperimentale. Viene inoltre stabilito il modello econometrico da utilizzare;

- 2) creazione del design;
- 3) creazione del questionario. Oltre agli esercizi di scelta individuati, è opportuno somministrare agli intervistati una serie di domande relative alle loro caratteristiche socioeconomiche. Tali informazioni sono essenziali sia per effettuare i necessari test di controllo qualitativo dei dati raccolti, sia per condurre le opportune analisi di segmentazione delle preferenze dichiarate.

3. IL QUESTIONARIO ED IL CAMPIONE ANALIZZATO

I dati sulle preferenze dichiarate sono stati raccolti attraverso questionari online, somministrati tra maggio e giugno 2019 ad un campione di 436 individui, tra cui studenti e personale amministrativo dell'Università e di un istituto tecnico di Trieste. Il questionario si compone di due parti.

Nella prima parte, sono state richieste una serie di informazioni socio-demografiche, tra cui genere, età, disponibilità di un garage, possesso di uno scooter. Queste informazioni verranno poi utilizzate per rilevare le eventuali fonti di eterogeneità delle preferenze all'interno del campione. Le risposte ottenute sono state poi filtrate. Se l'intervistato dichiara di guidare o essere già proprietario di uno scooter, vengono richieste informazioni più dettagliate sulla distanza giornaliera massima percorsa e sui costi di gestione (tassa di circolazione, premio assicurativo, costi di manutenzione, costi del carburante). Se, invece, l'intervistato dichiara di non possedere uno scooter, il questionario prosegue solo se il rispondente non esclude la possibilità di acquistare uno scooter in futuro. 208 intervistati (pari al 47,7% dell'intero campione) non considerano lo scooter come un mezzo di trasporto adatto alle loro esigenze di mobilità (non ne possiedono uno e non intendono acquistarlo – convenzionale o elettrico – in futuro). Pertanto, restringiamo le nostre analisi ad un campione di 228 intervistati.

Ulteriori informazioni sono state poi raccolte sul livello autodichiarato di conoscenza degli scooter in generale e di quelli elettrici in particolare e sull'esperienza diretta o indiretta (tramite amici, conoscenti) con uno scooter elettrico. Infine, indaghiamo la sensibilità ai temi ambientali da parte degli intervistati attraverso due indicatori: la partecipazione a manifestazioni ambientaliste e/o l'iscrizione ad un'associazione ambientalista; il grado di preoccupazione per i

problemi ambientali legati al luogo in cui vive. La sensibilità ai temi ambientali, infatti, è un esempio di attitudine che influenza il processo comportamentale, e può quindi deviare la scelta finale verso un'alternativa diversa da quella scelta nel caso di processi totalmente razionali secondo le ipotesi della teoria neoclassica.

La Tabella 1 contiene le statistiche descrittive del campione.

Tabella 1 – Statistiche descrittive

Numero di interviste utili per l'analisi	228
INFORMAZIONI SOCIO-DEMOGRAFICHE	
<i>Genere</i>	
Uomini	70.6%
Donne	29.4%
<i>Età</i>	
Da 15 a 21 anni	74.1%
Da 22 a 30 anni	18.0%
Da 31 a 56 anni	7.9%
POSSESSO DI UNO SCOOTER O DI UN GARAGE	
<i>Guida o è proprietario di uno scooter?</i>	
Sì	32.9%
No	67.1%
<i>Dispone di un garage in cui parcheggiare il suo scooter?</i>	
Sì	66.2%
No	33.8%
<i>Ha mai pensato di acquistare uno scooter elettrico?</i>	
Sì	32.5%
No	67.5%
CONOSCENZA DELLO SCOOTER	
<i>Qual è il suo livello di conoscenza degli scooter in generale?</i>	
1 = Scarso	39.0%
2 = Medio	46.5%
3 = Alto	14.5%

<i>Qual è il suo livello di conoscenza degli scooter elettrici?</i>	
1 = Scarso	80.7%
2 = Medio	18.0%
3 = Alto	1.3%
<i>Ha mai guidato uno scooter elettrico?</i>	
Sì	7.0%
No	93.0%
<i>Ha qualche conoscente che ha uno scooter elettrico?</i>	
Sì	7.5%
No	92.5%
SENSIBILITÀ AI TEMI AMBIENTALI	
<i>Ha mai partecipato ad una manifestazione ambientalista o si è mai iscritto ad una associazione ambientalista?</i>	
Sì	17.1%
No	82.9%
<i>"La situazione ambientale del luogo in cui vivo mi preoccupa sempre di più". Lei è...</i>	
1 = Totalmente in disaccordo	8.3%
2 = Parzialmente d'accordo	39.9%
3 = Totalmente d'accordo	51.8%

Il campione analizzato non è bilanciato: esso è composto per il 71% da uomini e per il restante 29% da donne. Gli intervistati sono studenti e impiegati di età compresa tra 15 e 56 anni. La maggior parte del campione è costituita da studenti di età inferiore ai 21 anni (74%), seguono poi i rispondenti nella classe di età 22-30 (18%) e quelli di età superiore ai 31 anni (8%). Un terzo del campione guida o possiede uno scooter e ha un garage dove parcheggiare e potenzialmente caricare lo scooter elettrico. Gli intervistati dichiarano di avere una conoscenza relativamente scarsa degli scooter, sia convenzionali che elettrici. In effetti, solo il 15% del campione si ritiene esperto di scooter, ma lo scenario è ancora peggiore nel caso dell'alternativa elettrica. Un consistente 81% degli intervistati, infatti, afferma di avere una scarsa conoscenza degli scooter elettrici (un risultato riscontrato anche da altri autori, come Zhu et al., 2019). Ciò è probabilmente dovuto al fatto che quasi nessuno (solo il 7%) ha avuto un'esperienza di guida, diretta o indiretta, con uno scooter elettrico. In Italia, in effetti, le misure promosse

dal Governo per favorire la diffusione degli scooter elettrici sono ancora poco efficaci, diversamente da quelle relative alle auto elettriche. Un esempio è rappresentato dall'Ecobonus, un sussidio nazionale sul prezzo d'acquisto promosso ad Aprile 2019 dal Ministero dello Sviluppo Economico che offre contributi per l'acquisto di veicoli a ridotte emissioni². In particolare, sono ammessi al contributo i veicoli a due ruote elettrici o ibridi nuovi di fabbrica, di potenza inferiore o uguale a 11 kW, delle categorie L1e ed L3e, acquistati, anche in locazione finanziaria, ed immatricolati in Italia nell'anno 2019. Il contributo è vincolato alla contestuale consegna per la rottamazione di un veicolo omologato alle classi Euro 0, 1, 2 (proprietà o utilizzo, nel caso di locazione finanziaria, da almeno dodici mesi) ed ammonta al 30% del prezzo d'acquisto del veicolo IVA esclusa fino a un massimo di 3.000 €. Tuttavia, una serie di intoppi tecnologici e burocratici registrati dal portale del Mise e legati anche all'individuazione dei mezzi rottamabili hanno impedito a molti potenziali acquirenti di beneficiare del sussidio. Solo a fine giugno con il varo del Decreto Crescita tali problemi sono stati superati, ma ad oggi risultano erogati meno di 500 mila euro sui 10 milioni stanziati.

Il 17% delle persone ha partecipato ad una manifestazione ambientalista e/o è membro di un'associazione ambientalista. Più della metà (51%) degli intervistati concorda completamente con l'affermazione secondo cui la situazione ambientale del luogo in cui vivono, lavorano o studiano è sempre più preoccupante ed il 40% è abbastanza ma non completamente d'accordo.

La seconda parte del questionario propone al rispondente 10 esercizi di scelta ipotetica.

Agli intervistati viene chiesto di selezionare per ciascuno scenario una tra due alternative etichettate: scooter elettrico vs scooter convenzionale. Le due alternative sono definite sulla base di una serie di attributi, ciascuno dei quali è ulteriormente descritto da livelli precedentemente ricavati da un *design* sperimentale.

La definizione degli attributi e dei livelli è estremamente importante in quanto essi, delimitando l'insieme delle caratteristiche dello scooter rispetto alle quali vengono stimate le preferenze, determinano le potenzialità informative dell'indagine. L'analisi della letteratura e indagini di mercato hanno permesso di indentificare gli attributi più rilevanti e i relativi livelli, perfezionati poi attraverso diversi pre-test, in cui sono state analizzate eventuali criticità dell'indagine progettata e apportate le modifiche ritenute necessarie.

Le alternative sono state descritte in termini di sette attributi sperimentali: prezzo di acquisto, costo per il carburante/elettricità, costo annuale per la tassa

² <https://ecobonus.mise.gov.it/>

di circolazione (bollo) e per il premio assicurativo, autonomia massima (km), potenza del motore (kW), paese produttore dello scooter (Europa o Cina) e, solo per gli scooter elettrici, la disponibilità o meno di una batteria estraibile. La scelta dell'ultimo attributo è dovuta al fatto che uno dei maggiori ostacoli alla penetrazione dello scooter elettrico è dato dalle limitazioni delle loro batterie, ovvero scarse prestazioni, lunghi tempi di ricarica, autonomia limitata, costo elevato e breve durata (Huang et al., 2018). Una possibile soluzione almeno ad una parte di queste limitazioni è rappresentata dalla batteria estraibile. Essa può essere rimossa e caricata comodamente a casa o in ufficio alla normale presa domestica, o addirittura sostituita con una batteria carica presso apposita stazione di ricarica con tempi addirittura inferiori a quelli necessari per un rifornimento tradizionale.

I livelli individuati per ciascun attributo sono riportati nella Tabella 2.

Per la costruzione dei diversi scenari, abbiamo poi sviluppato un *design* efficiente per il modello MNL utilizzando il software Ngene (Bliemer e Rose, 2011). A differenza di un *design* ortogonale, esso permette di generare dati che portano a stime dei parametri con errori standard il più piccoli possibili. Più efficiente è il *design* più precisa è la stima dell'importanza relativa che gli attributi studiati hanno nella definizione delle preferenze degli intervistati. Il *design* costruito è completo (*design* fattoriale pieno, *full factorial*) e non fattoriale frazionato. I 20 scenari generati derivano quindi da tutte le combinazioni possibili dei livelli di tutti gli attributi indagati. Tuttavia, per superare uno dei vincoli più stringenti nella costruzione dei test di rilevazione, ovvero un numero eccessivo di esercizi di scelta da somministrare al campione, abbiamo suddiviso il campione da intervistare in due sottogruppi di pari numerosità e somministrato a ciascuno di essi 10 profili del *design* fattoriale completo.

Tabella 2 – Livelli per ciascun attributo negli esercizi di scelta

	Scooter elettrico	Scooter tradizionale
Prezzo d'acquisto (€1.000)	2; 3; 4; 5; 6; 7	2; 2,5; 3; 3,5; 4
Autonomia (100 km)	0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5	2; 2,5; 3; 3,5; 4
Potenza (kW)	2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9	2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9
Costo carburante/elettricità (€/100 km)	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1	3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6
Bollo e premio assicurativo (€100)	1; 1,25; 1,5; 2	2; 2,5; 3; 3,5

4. RISULTATI

Studiamo ora le preferenze dei potenziali acquirenti nella scelta di uno scooter applicando in primo luogo un modello standard logit multinomiale (MNL), e poi considerando l'eterogeneità nelle preferenze attraverso un modello mixed logit (MXL).

4.1. Modello logit multinomiale

Il modello completo stimato ha la seguente specificazione:

U(scooter elettrico) =	$ \begin{aligned} &ASC + \beta_{prezzo} * Prezzo + \beta_{carbur} * Carburante + \beta_{autonomia_E} * Autonomia_E \\ &+ \beta_{potenza} * Potenza + \beta_{BolloAss} * BolloAssicur + \beta_{batteria} * BatteriaEstr + \\ &\beta_{Paese} * Paese + \beta_{proprietario} * Proprietario + \beta_{età} * Età + \beta_{Genere} * Genere \\ &+ \beta_{Garage} * Garage + \beta_{Conosc} * Conoscenza + \beta_{Conosc_E} * Conoscenza_E \\ &+ \beta_{Esper_Dir} * EsperienzaDiretta + \beta_{Esper_Indir} * EsperienzaIndiretta + \\ &\beta_{AssAmbient} * AssocAmbientalista + \beta_{Preoccup} * Preoccupaz + \beta_{Considerer} * Considerer \end{aligned} $
U(scooter endotermico) =	$ \begin{aligned} &\beta_{prezzo} * Prezzo + \beta_{carbur} * Carburante + \beta_{autonomia_B} * Autonomia_B + \\ &\beta_{potenza} * Potenza + \beta_{BolloAss} * BolloAssicur + \beta_{Paese} * Paese \end{aligned} $

dove ASC è la costante specifica dell'alternativa elettrica (lo scooter convenzionale è l'alternativa omessa) e l'autonomia è assunta come un attributo specifico per ciascuna delle due alternative.

La tabella 3 riassume le stime del modello MNL. Abbiamo stimato il modello dapprima utilizzando tutte le osservazioni, poi scartando le 210 scelte lessicografiche. Le due stime non differiscono in modo significativo. Abbiamo scelto di presentare i risultati ottenuti considerando il numero complessivo di interviste, pari a 228 (2.280 osservazioni).

Il modello 1 considera solo gli attributi dello scooter (prezzo, consumi, autonomia, potenza, tasso di circolazione e premio assicurativo, batteria estraibile e paese del produttore). Il modello 2 aggiunge ulteriori informazioni sulle caratteristiche sociodemografiche degli intervistati (età, sesso e disponibilità del garage) e sulle variabili di preferenza, in particolare il possesso dello scooter, il livello autodichiarato di conoscenza dello scooter in generale e di quello elettrico in particolare, l'eventuale esperienza di guida pregressa con uno scooter elettrico (diretta o indiretta, tramite conoscenti), la sensibilità ai temi ambientali e il

Tabella 3 –Stime modello MNL

	MODELLO 1				MODELLO 2			
	COEFF.	STD.ERR.	T-RATIO	WTP	COEFF.	STD.ERR.	T-RATIO	WTP
ASC	-0,691**	0,276	-2,504	-1776	-1,386***	0,401	-3,454	-3422
Prezzo (1000 €)	-0,389***	0,026	-15,071		-0,405***	0,027	-15,243	
Costo carburante (€/100 km)	-0,187***	0,042	-4,395	-480	-0,196***	0,043	-4,514	-485
Autonomia_elettrico (100 km)	1,038***	0,131	7,951	27	1,093***	0,134	8,146	27
Autonomia_endotermico (100 km)	0,262***	0,069	3,820	7	0,272***	0,070	3,874	7
Potenza (kW)	0,101***	0,011	8,961	260	0,105***	0,012	9,055	259
Bollo+Assicurazione (100 €)	-0,228***	0,050	-4,523	-6	-0,234***	0,052	-4,506	-6
Batteria Estraibile	0,081	0,099	0,809		0,083	0,102	0,818	
Paese produttore	0,212***	0,052	4,083	545	0,219***	0,053	4,125	540
Proprietà scooter					-0,212**	0,108	-1,959	-524
Età					0,002	0,007	0,238	
Genere					-0,119	0,111	-1,072	
Garage					0,074	0,102	0,727	
Conoscenza scooter					-0,284***	0,084	-3,368	-702
Conoscenza scooter elettrico					0,149	0,128	1,166	
Esperienza diretta					-0,204	0,192	-1,063	
Esperienza indiretta					0,363**	0,189	1,918	897
Membro assoc. ambientalista					0,360***	0,133	2,699	889
Preoccupaz. ambientale					0,337***	0,074	4,538	833
Considerer					0,450***	0,106	4,240	1110
	Log likelihood function			-1402,492	Log likelihood function			-1353,334
	Numero di osservazioni			2280	Numero di osservazioni			2280
	RsqaAdj			0,10570	RsqaAdj			0,13285

fatto di aver preso in considerazione l'idea di acquistare uno scooter elettrico (considerer).

Notiamo innanzitutto che tutti gli attributi considerati si sono rivelati effettivamente importanti e significativi per la scelta.

Per quanto riguarda il Modello 1, tutti i parametri considerati sono statisticamente significativi e hanno il segno atteso, fatta eccezione per la caratteristica della batteria estraibile, risultata non significativa. L'ASC per l'alternativa elettrica, negativa e fortemente significativa, indica che, *ceteris paribus*, lo scooter tradizionale è decisamente preferito rispetto all'alternativa elettrica. Questo risultato non è sempre in linea con gli studi precedenti. Le preferenze e le caratteristiche dei consumatori variano a seconda dei mercati e dei paesi e anche le misure adottate dai vari governi possono condurre a politiche molto diverse, promuovendo o contrastando la diffusione di scooter elettrici (Eccarius e Lu, 2019). Ciò si traduce in atteggiamenti molto diversi nei confronti degli scooter elettrici. I parametri stimati dal modello rappresentano utilità marginali ed il rapporto tra il parametro di ciascun attributo ed il negativo del parametro di prezzo rappresenta la disponibilità a pagare (*willingness to pay*, *WTP*) del rispondente per l'attributo considerato. Con riferimento all'ASC, troviamo che *ceteris paribus* solo un prezzo di listino per gli scooter elettrici più basso di 1.776 € renderebbe l'intervistato medio del nostro campione disposto a scegliere uno scooter elettrico piuttosto che uno endotermico.

Tutti gli attributi monetari (prezzo di acquisto, costo del carburante/elettricità, bollo più premio assicurativo) hanno un impatto negativo e significativo: i loro parametri sono tutti negativi e statisticamente significativi (a livello dell'1%), come atteso. Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche, la potenza e l'autonomia influiscono positivamente sulla scelta di uno scooter. Più specificamente, il parametro relativo all'autonomia per gli scooter elettrici è quasi quattro volte più grande di quello riferito agli scooter convenzionali, confermando l'atteggiamento di *range anxiety* che emerge in molti altri studi sui veicoli elettrici. In termini di WTP, gli intervistati valutano un chilometro in più di autonomia 27 € nel caso degli scooter elettrici e 7 € nel caso degli scooter convenzionali. Quanto alla potenza, un kW aggiuntivo di potenza viene valutato 259 €. La possibilità di rimuovere la batteria, invece, sembra non essere rilevante nel nostro campione, probabilmente a causa della mancanza di conoscenza di questa possibile caratteristica degli scooter elettrici. Il paese del produttore, da intendersi come brand dello scooter, invece, gioca un ruolo importante nella scelta dello scooter: la sfiducia nei produttori cinesi persiste, i prodotti "made in Europe" sono più apprezzati di quelli cinesi, tanto che gli intervistati sono disposti a pagare 545 € in più per uno scooter europeo piuttosto che cinese.

Nel Modello 2 (Tabella 3) testiamo lo stesso modello aggiungendo agli attributi dello scooter le caratteristiche sociodemografiche dei rispondenti e le variabili di preferenza precedentemente descritte. Per quanto riguarda l'ASC e gli attributi dello scooter, le stime confermano i risultati ottenuti con il Modello 1. Con riferimento all'ASC, in particolare, troviamo una WTP più elevata, pari a 3.422 €, in quanto la costante è depurata dall'effetto delle variabili aggiunte rispetto al Modello 1. Altri risultati sono comunque degni di nota. In particolare, i rispondenti che già possiedono uno scooter hanno una minore propensione a sceglierne uno elettrico. Questo risultato è confermato dal parametro negativo e statisticamente significativo relativo al livello di conoscenza autodichiarata dello scooter: coloro i quali si ritengono esperti di scooter ricavano una maggiore disutilità dalla scelta dell'alternativa elettrica, probabilmente perché più riluttanti a cambiare il sistema di propulsione finora adottato oppure perché con una buona conoscenza degli scooter convenzionali, ma non altrettanta familiarità con quelli elettrici. In effetti, il parametro relativo al livello autodichiarato di conoscenza degli scooter elettrici mostra il segno positivo atteso: la probabilità di scelta dello scooter elettrico aumenta tra gli esperti di scooter elettrico, che verosimilmente apprezzano le sue caratteristiche tecniche, gli aspetti ambientali e i risparmi sui costi operativi; il parametro collegato a questa variabile tuttavia non risulta statisticamente significativo, probabilmente perché nel campione esaminato sono davvero pochi i rispondenti che dichiarano di conoscere lo scooter elettrico.

L'aver avuto una precedente esperienza di guida con uno scooter elettrico influenza, ma moderatamente, la probabilità di scelta dell'alternativa elettrica. Mentre il passaparola di conoscenti che hanno a disposizione uno scooter elettrico influisce positivamente sulla probabilità di sceglierne uno, risulta che una pregressa esperienza di guida (diretta) non ha un ruolo, forse perché nel nostro campione solo 16 intervistati hanno guidato uno scooter elettrico almeno una volta.

La percezione della qualità ambientale del luogo in cui gli intervistati vivono o lavorano sembra anche influenzare la probabilità di scegliere uno scooter elettrico. Gli intervistati che hanno partecipato ad una manifestazione ambientalista o si sono iscritti ad un'associazione ambientalista, o che si dichiarano preoccupati per i problemi ambientali del luogo in cui vivono, sono coloro i quali traggono una maggiore utilità dalla scelta di uno scooter elettrico piuttosto che convenzionale. I parametri legati alle due variabili infatti sono positivi e statisticamente significativi a livello dell'1%.

I *considerers* (coloro che hanno già pensato di acquistare uno scooter elettrico) ovviamente sono più propensi agli scooter elettrici; il parametro positivo e altamente significativo (a livello dell'1%) rappresenta un controllo importante.

Le altre variabili esplicative inserite nel modello non sono risultate statisticamente significative; l'età, il genere, la disponibilità di un garage non sembrano

essere determinanti nella scelta tra scooter con diversi sistemi di propulsione; nel campione analizzato non risultano esserci differenze significative nella scelta tra uomini e donne, individui più o meno giovani, e che hanno o meno un box privato in cui poter parcheggiare ed eventualmente ricaricare lo scooter.

L'aggiunta di variabili socioeconomiche e di preferenza nel modello 2 ne migliorano notevolmente la bontà rispetto al Modello 1. L' R^2 aggiustato aumenta da 0,10570 nel Modello 1 a 0,13285 nel Modello 2, e con il test del rapporto tra le verosimiglianze si può rifiutare l'ipotesi nulla che il modello 2 non sia migliore del modello di base (modello 1). Un altro metodo utile per determinare la bontà del modello consiste nell'esaminare una tabella di contingenza degli esiti della scelta previsti per il campione in base al modello stimato rispetto agli esiti della scelta effettiva esistenti nei dati. Troviamo che il Modello 2 prevede correttamente l'esito della scelta effettiva nel 59.30% dei casi.

Abbiamo infine anche testato un modello con alcuni termini di interazione, per verificare se l'importanza di alcuni attributi potesse essere influenzata da alcune variabili socioeconomiche. In particolare, abbiamo interagito il prezzo d'acquisto e la potenza con l'età (ipotizzando a priori l'esistenza di una relazione inversa tra i due attributi e l'età), la potenza con il genere (ipotizzando che questo attributo possa essere più apprezzato dal genere maschile) e la caratteristica della batteria estraibile con la disponibilità di un garage (ipotizzando che questa caratteristica dello scooter sia più importante per coloro che non dispongono di un garage in cui poter ricaricare lo scooter). Nessuna di queste interazioni, tuttavia, è risultata statisticamente significativa, ad eccezione di quella tra prezzo ed età. L'età, in particolare, non è stata trattata come variabile continua, ma ripartita in tre classi, costruite in modo tale da suddividere il campione in base ad una disponibilità reddituale crescente e sempre più stabile: intervistati di età inferiore ai 21 anni; intervistati tra 22 e 30 anni; intervistati con più di 31 anni. Le stime ottenute rivelano che l'unica interazione statisticamente significativa è quella tra la prima classe d'età ed il prezzo; il segno positivo del parametro indica che i più giovani sembrano essere meno sensibili al prezzo d'acquisto: l'effetto negativo complessivo del prezzo di acquisto sulla probabilità di scegliere uno scooter elettrico è quindi smorzato.

4.2. *Modello logit a parametri casuali*

Al fine di tenere conto dell'eterogeneità delle preferenze e spiegarne le determinanti, abbiamo testato diverse specificazioni di un modello logit a parametri casuali. Riportiamo in Tabella 4 le stime ottenute, considerando il modello con il maggior numero di parametri significativi e la massima bontà esplicativa.

Tabella 4 –Stime modello RPL

	COEFF.	STD.ERR.	T-RATIO
PARAMETRI CASUALI			
ASC	-1,301*	0,733	-1,775
Prezzo (1000 €)	-0,649***	0,152	-4,272
Autonomia_elettrico (100 km)	0,958**	0,483	1,985
Paese produttore	-0,052	0,228	-0,230
PARAMETRI FISSI			
Costo carburante (€/100km)	-0,266***	0,054	-4,896
Potenza (kW)	0,136***	0,017	8,189
Bollo+Assicurazione (100 €)	-0,300***	0,075	-4,027
Batteria Estraibile	0,127	0,132	0,963
Autonomia_endotermico (100 km)	0,331***	0,089	3,726
ETEROGENEITÀ IN MEDIA			
ASC : Conoscenza scooter elettrico	0,231	0,271	0,854
ASC : Conoscenza scooter	-0,993***	0,278	-3,568
ASC : Esperienza diretta	-0,258	0,410	-0,63
ASC : Esperienza indiretta	0,58	0,396	1,464
ASC: Preoccupaz. ambientale	0,442***	0,164	2,701
ASC: Membro assoc. ambientalista	0,814*	0,470	1,731
ASC : Considerer	0,577**	0,226	2,56
Prezzo: Preoccupaz. ambientale	0,033	0,059	0,555
Prezzo: Membro assoc. ambientalista	-0,036	0,102	-0,349
Autonomia_elettrico: Conoscenza scooter	0,480**	0,252	1,901
Autonomia_elettrico: Membro assoc. ambientalista	-0,295	0,468	-0,631
Paese produttore : Conoscenza scooter elettrico	-0,176	0,181	-0,971
Paese produttore : Conoscenza scooter	0,320**	0,116	2,762
Log likelihood function	-1259,405		
Numero di osservazioni	2280		
RsqaAdj	0,19391		

Trattando tutte le variabili esplicative del modello come variabili casuali che seguono una distribuzione Normale, abbiamo individuato quelle con deviazioni standard statisticamente significative. Esse sono: l'ASC, il prezzo d'acquisto, l'autonomia dello scooter elettrico e il paese del produttore. Queste suggeriscono l'esistenza di eterogeneità nel campione: individui diversi presentano stime di questi parametri che possono differire da quella del parametro medio del campione, stimata con il modello MNL.

Le stime riportate in Tabella 4 confermano che i parametri casuali ASC, prezzo e autonomia dello scooter elettrico sono statisticamente significativi e con il segno atteso, ed anche gli altri parametri, trattati come fissi, lo sono, eccezion fatta per la caratteristica della batteria estraibile, confermando pertanto i risultati ottenuti con il più semplice modello MNL.

Le interazioni tra i parametri casuali e alcune variabili latenti mostrano alcuni risultati interessanti.

Il segno negativo dell'interazione (significativa all'1%) tra l'ASC ed il livello autodichiarato di conoscenza degli scooter indica che l'attitudine già in media negativa allo scooter elettrico è amplificata tra coloro che si ritengono esperti di scooter. In altri termini, maggiore è il livello autodichiarato di conoscenza dello scooter, minore è l'utilità relativa che si trae dalla scelta di uno scooter elettrico. L'autonomia dello scooter elettrico è poi un attributo a cui sembrano più sensibili gli individui appassionati di scooter. La consapevolezza ambientale influisce positivamente sulla probabilità di scegliere uno scooter elettrico: per gli ambientalisti l'attitudine negativa verso lo scooter elettrico viene smorzata. Coloro che hanno già preso in considerazione l'idea di acquistare uno scooter elettrico effettivamente sono più inclini all'alternativa elettrica, quindi l'effetto negativo della costante viene smorzato. L'attenzione ai temi ambientali non sembra influenzare la sensibilità dei rispondenti al prezzo d'acquisto. Il livello di conoscenza autodichiarato dello scooter invece influenza la sensibilità al paese di produzione dello scooter: gli esperti sono più scettici verso gli scooter "made in China", ma le stesse considerazioni non valgono tra coloro che si dichiarano conoscitori di scooter elettrici: il segno dell'interazione è addirittura negativo, ma non statisticamente significativo.

5. ANALISI DI SIMULAZIONE

Dopo aver studiato nei paragrafi precedenti la relazione tra la scelta (variabile dipendente) e le variabili indipendenti (attributi dello scooter, caratteristiche degli intervistati, ecc.), analizzandone segno ed intensità, in questo paragrafo realizziamo un'analisi predittiva, ovvero stimiamo come cambiano le scelte se si

Tabella 5 – Vespa elettrica e a benzina a confronto

	VESPA	
	SCOOTER ELETTRICO	SCOOTER BENZINA
Prezzo di listino (MSRP)	€ 6.390	€ 2.400
Costo carburante/energia (per 100 km)	0,8 €/100km	4,79 €/100km
Autonomia	100 km	267 km
Potenza	4 kW	2,4 kW
Bollo + Premio assicurativo	€ 125	€ 250
Batteria estraibile	no	
Paese produttore	Europa	Europa

agisce su alcune delle variabili indipendenti controllate. Più precisamente, sulla base delle stime precedentemente riportate, stimiamo innanzitutto la probabilità di scegliere uno scooter elettrico rispetto ad uno a combustione interna considerando le attuali condizioni di mercato; valutiamo poi le prospettive di mercato dello scooter elettrico analizzando l'impatto che una misura economica incentivante, come ad esempio un sussidio all'acquisto, o miglioramenti tecnologici (in termini di aumento dell'autonomia) possono avere sulla probabilità di scelta dell'alternativa elettrica.

A questo scopo abbiamo considerato, a titolo di esempio, la scelta tra due scooter italiani, la Vespa Piaggio, nelle sue due versioni, a benzina ed elettrica. La Tabella 5 riporta i livelli reali degli attributi per i due scooter. La Vespa elettrica ha un prezzo di listino (MSRP) 2,7 volte più alto di quello della versione a benzina, una potenza doppia e un'autonomia adeguata ad un uso urbano (100 km). I costi operativi (carburante, bollo, assicurazione) si dimostrano molto più bassi di quelli necessari per lo scooter tradizionale.

Consideriamo ora due casi estremi: individui con caratteristiche che, in base alle stime precedentemente riportate con riferimento al modello MNL (considerando solo i parametri statisticamente significativi), portano rispettivamente alla più alta e alla più bassa probabilità di scelta della versione elettrica. Riportiamo queste caratteristiche nella Tabella 6. Come discusso nei paragrafi precedenti, le stime ottenute mostrano che i rispondenti che dispongono già di uno scooter e se ne considerano esperti (massimo livello di conoscenza), che non hanno mai pensato di acquistare uno scooter elettrico, e non ne hanno mai avuto espe-

Tabella 6 – Caratteristiche degli individui legate alla più bassa e più alta probabilità di scelta dello scooter elettrico

	<i>Non ambientalista esperto di scooter (Bassa probabilità)</i>	<i>Ambientalista, non esperto di scooter (Alta probabilità)</i>
Proprietà scooter	Sì	No
Conoscenza scooter	3 = Alta	1 = Scarsa
Esperienza indiretta	No	Sì
Membro associazione ambientalista	No	Sì
Preoccupazione ambientale	1 = Molto bassa	3 = Molto alta
Considerer	No	Sì

Tabella 7 – Simulazioni sulla probabilità di scelta della Vespa elettrica considerando l'Ecobonus e/o miglioramenti tecnologici

Sulla base delle stime con MNL	<i>% scooter elettrico (Bassa probabilità)</i>	<i>% scooter elettrico (Alta probabilità)</i>
Con MSRP + autonomia attuale	10,7%	62,5%
Ecobonus	20,7%	78,3%
Ecobonus + autonomia 1.5 volte maggiore	31,1%	86,2%
Sconto del 40% su MSRP e autonomia 2 volte maggiore	50,2%	93,3%

rienza di guida (neanche tramite conoscenti), poco sensibili alle problematiche ambientali, avranno una elevata disutilità dalla scelta dell'alternativa elettrica, e quindi la più bassa probabilità di scelta della versione elettrica rispetto a quella a benzina. Gli individui con queste caratteristiche, in particolare, considerando i prezzi di listino attuali e i livelli correnti di autonomia, sceglieranno lo scooter elettrico solo il 10,7% delle volte (Tabella 7). Viceversa, individui con caratteristiche opposte propenderanno per la versione elettrica nel 62,5% dei casi. L'introduzione dell'Ecobonus con la previsione di uno sconto del 30% sul prezzo di listino raddoppia la probabilità di scelta dell'elettrico nel primo scenario (bassa probabilità), tuttavia non è sufficiente a convincere gli esperti di scooter poco sensibili alle tematiche ambientali a passare all'elettrico. Solo particolari com-

binazioni di politiche incentivanti e miglioramento tecnologico porterebbero questi individui a rinunciare alla versione a benzina almeno la metà delle volte. In particolare, un sussidio all'acquisto (o uno sconto) pari al 40% del prezzo di listino e una innovazione tecnologica in grado di raddoppiare i livelli attuali di autonomia porterebbe ad una probabilità di scelta dell'elettrico pari al 50,2% nel primo scenario e al 93,3% nel secondo.

Ripetiamo ora le stesse considerazioni confrontando uno scooter elettrico cinese, il Niu NGT, con l'italiana Vespa a benzina. La Tabella 8 riassume le principali caratteristiche dei due scooter. Il prezzo di listino dello scooter cinese è più basso rispetto a quello della Vespa elettrica, con un'autonomia e un'efficienza maggiori, e con la possibilità di estrarre la batteria. Considerando i due scenari sopra descritti (Tabella 6), stimiamo una probabilità di scelta dell'alternativa elettrica alle condizioni attuali di mercato compresa tra il 25,5% (primo scenario, meno favorevole) e l'82,6% (secondo scenario, più favorevole), percentuali

Tabella 8 – Niu NGT elettrica e Vespa a benzina a confronto

	NIU NGT ELETTRICO	VESPA A BENZINA
Prezzo di listino (MSRP)	€ 4.499	€ 2.400
Costo carburante/energia (per 100 km)	0,5 €/100km	4,79 €/100km
Autonomia	150 km	267 km
Potenza	3 kW	2,4 kW
Bollo + Premio assicurativo	€ 125	€ 250
Batteria estraibile	Sì	
Paese produttore	Cina	Europa

Tabella 9 – Simulazioni sulla probabilità di scelta del Niu NGT elettrico considerando l'Ecobonus e/o miglioramenti tecnologici

Sulla base delle stime con MNL	% scooter elettrico (Bassa probabilità)	% scooter elettrico (Alta probabilità)
Con MSRP + autonomia attuale	25,5%	82,6%
Ecobonus	37,2%	89,1%
Ecobonus + autonomia 1.5 volte maggiore	57,3%	94,9%

quindi maggiori rispetto al confronto precedente. Anche in questo caso, individui poco esperti di scooter e fortemente sensibili a temi ambientali propendono per l'alternativa elettrica anche in assenza di misure incentivanti, apprezzando le attuali prestazioni dello scooter elettrico. L'introduzione dell'Ecobonus, riducendo il prezzo pagato per l'acquisto dello scooter elettrico, sicuramente ne aumenta la probabilità di scelta, ma, come nel confronto precedente, questa misura incentivante, da sola, non è sufficiente a convincere gli individui del primo scenario a scegliere la versione elettrica. La condizione di break-even prevede di affiancare all'Ecobonus un aumento del 150% nei livelli di autonomia.

6. CONCLUSIONI

Questo lavoro si propone di analizzare le prospettive di mercato per gli scooter elettrici in Italia attraverso un'indagine sulle preferenze dichiarate.

I risultati dei modelli MNL e RPL ci consentono di concludere che prevale ancora un atteggiamento negativo nei confronti degli scooter elettrici. *Ceteris paribus* solo un prezzo di listino più basso di 3.422 € renderebbe l'intervistato medio del nostro campione disposto a scegliere uno scooter elettrico piuttosto che uno a benzina. Le variabili monetarie (prezzo di acquisto, costo del carburante/energia, bollo e premio assicurativo) influiscono negativamente sulla probabilità di scelta degli scooter elettrici. Da qui l'importanza di misure incentivanti come i sussidi all'acquisto. L'Ecobonus ne è un esempio, ma le analisi di simulazione realizzate dimostrano che, da sole, queste misure non sono sufficienti a convincere anche i più scettici a passare all'elettrico. Anche le variabili tecnologiche (autonomia, potenza) hanno un ruolo rilevante. In particolare, gli intervistati valutano un chilometro in più di autonomia 27 € nel caso degli scooter elettrici e 7 € nel caso degli scooter convenzionali, confermando l'atteggiamento di *range anxiety* che emerge in molti altri studi sui veicoli elettrici (Giansoldati et al., 2018). Pertanto, oltre alle misure incentivanti promosse a livello nazionale e/o regionale, anche i produttori devono giocare un ruolo importante, investendo in innovazione tecnologica e offrendo sul mercato modelli sempre più performanti e a prezzi più contenuti.

La combinazione di queste misure, tuttavia, porta a stime della probabilità di scelta dell'elettrico rispetto all'endotermico molto maggiori rispetto alle reali quote di mercato degli scooter analizzati. Diverse possono essere le spiegazioni. Il prezzo di listino dello scooter elettrico, molto più alto di quello degli scooter tradizionali, potrebbe rappresentare una barriera molto più rilevante di quanto emerge nei modelli applicati. I vantaggi derivanti dai risparmi annuali sul costo dell'energia, dalla gratuità del bollo, dai più bassi premi assicurativi, non ven-

gono spesso apprezzati e percepiti sufficienti a coprire il più elevato esborso iniziale. Inoltre, fattori non monetari potrebbero prevalere su quelli monetari nelle decisioni sul sistema di propulsione da acquistare. Dalle stime ottenute, ad esempio, emerge come il livello di conoscenza dello scooter sia importante nel processo decisionale: gli amanti degli scooter sono riluttanti a cambiare il sistema di propulsione finora adottato, ma l'esperienza pregressa con uno scooter elettrico attenua la percezione negativa. Anche la sensibilità ai temi ambientali gioca un ruolo rilevante: gli ambientalisti saranno i primi ad orientarsi verso la nuova tecnologia. Altri aspetti, come le preoccupazioni per il degrado della batteria e la mancanza di stazioni di ricarica (in caso di scooter con batteria non estraibile e non disponibilità di un garage), i dubbi sugli effettivi benefici ambientali, o le barriere psicologiche possono ulteriormente spiegare il gap tra le quote di mercato effettive e le stime ottenute. Tutti questi aspetti, che considerano processi cognitivi individuali, andrebbero opportunamente considerati nel modello di base, integrando alle variabili direttamente osservabili altre latenti e rendendo il modello un cosiddetto "modello ibrido" (Giansoldati et al., 2019). Ciò permetterebbe al decisore pubblico di disegnare linee di intervento diversificate che possano ottenere il massimo risultato. Questi aspetti saranno oggetto di ulteriori e futuri approfondimenti.

- ACEM (European Association of Motorcycle Manufacturers) (2019). Market data (<https://www.acem.eu/market-data>)
- Allcott, H., Wozny, N. (2014). Gasoline prices, fuel economy, and the energy paradox. *Review of Economics and Statistics*, 96(5), 779-795.
- Ben-Akiva, M. E., Lerman, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand* (Vol. 9). MIT press.
- Delucchi, M. A., Lipman, T. E. (2001). An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(6), 371-404.
- Eccarius, T., & Lu, C. C. (2019). Powered two-wheelers for sustainable mobility: A review of consumer adoption of electric motorcycles. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-17.
- 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., Scorrano, M., Danielis, R. (2019). Does electric car knowledge influence car choice? Evidence from a hybrid choice model. Mimeo.
- Guerra, E. (2017). Electric vehicles, air pollution, and the motorcycle city: A stated preference survey of consumers' willingness to adopt electric motorcycles in Solo, Indonesia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.
- Huang, S. K., Kuo, L., Chou, K. L. (2018). The impacts of government policies on green utilization diffusion and social benefits—A case study of electric motorcycles in Taiwan. *Energy policy*, 119, 473-486.
- Jones, L. R., Cherry, C. R., Vu, T. A., Nguyen, Q. N. (2013). The effect of incentives and technology on the adoption of electric motorcycles: A stated choice experiment in Vietnam. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 57, 1-11.
- Krause, R. M., Carley, S. R., Lane, B. W., Graham, J. D. (2013). Perception and reality: Public knowledge of plug-in electric vehicles in 21 US cities. *Energy Policy*, 63, 433-440.
- Lancaster, K. J. (1966). A new approach to consumer theory. *Journal of political economy*, 74(2), 132-157.
- Marcucci, E. (Ed.). (2005). *I modelli a scelta discreta per l'analisi dei trasporti: teoria, metodi e applicazioni*. Carocci.
- Martos, A., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J., Jadraque-Gago, E. (2016). Towards successful environmental performance of sustainable cities: Intervening sectors. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 479-495.
- Massi Pavan, A. M., Lughi, V., Scorrano, M. (2019). Total Cost of Ownership of electric vehicles using energy from a renewable-based microgrid. In *2019 IEEE Milan PowerTech* (pp. 1-6). IEEE.
- Platt, S. M., Haddad, I. E., Pieber, S. M., Huang, R. J., Zardini, A. A., Clairotte, M., ... Slowik, J. G. (2014). Two-stroke scooters are a dominant source of air pollution in many cities. *Nature communications*, 5, 3749.

Scorrano, M., Danielis, R., Giansoldati, M. (2019a). Dissecting the total cost of ownership of fully electric cars in Italy: the impact of annual distance travelled, home charging and urban driving. Mimeo.

Scorrano, M., Danielis, R., Giansoldati, M. (2019b). 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*, vol. XLVI, n. 3.

Train, K. E. (2009). *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge university press.

Tseng, H. K., Wu, J. S., & Liu, X. (2013). Affordability of electric vehicles for a sustainable transport system: An economic and environmental analysis. *Energy policy*, 61, 441-447.

Evidenze sulle abitudini modali e sulla sostenibilità dei trasporti in ambito accademico.

Il caso dell'Università di Trieste

ADRIANA MONTE, MARCO GIAN SOLDATI

1. INTRODUZIONE: IL RUOLO DEL PROGETTO MUSE E LO SCOPO DEL CONTRIBUTO

Il presente lavoro nasce all'interno del progetto europeo MUSE,¹ che ha il fine di promuovere una mobilità universitaria sostenibile ed energeticamente efficiente.² Il nostro contributo si inserisce all'interno di tale iniziativa con l'obiettivo primario di comprendere quali sono le abitudini di mobilità degli studenti, dei docenti e del personale tecnico amministrativo ponendo l'enfasi sulla loro sensibilità ambientale. Ciò appare particolarmente utile per conoscere quali sono

¹ Il progetto MUSE, "Collaborazione transfrontaliera per la mobilità universitaria sostenibile energeticamente efficiente", è finanziato dall'Unione Europea, ha avuto inizio nel gennaio 2017 e si concluderà nel marzo 2020. Capofila del progetto è il Dipartimento di Ingegneria ed Architettura dell'Università degli Studi di Trieste, sotto la cui direzione operano altri soggetti, ovvero il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche "Bruno de Finetti" dello stesso ateneo, la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ed in particolare la Direzione Energia, l'Unione Territoriale Intercomunale (UTI) del Noncello (Comuni di Fontanafredda, Porcia, Pordenone, Roveredo in Piano e Zoppola), Università di Ljubljana, l'Agenzia di sviluppo regionale di Ljubljana e l'Agenzia di sviluppo regionale di Nova Gorica.

² La finalità generale del progetto ed i tre obiettivi specifici dello stesso, così come delineati dalla Regione Friuli Venezia Giulia, sono descritti in modo dettagliato alla seguente URL: <http://www.regione.fvg.it/rafvfg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/energia/FOGLIA120/> il cui ultimo accesso è stato realizzato in data 24 agosto 2019.

le eventuali prospettive e potenzialità di decarbonizzazione dei trasporti in un contesto che alimenta un volume non trascurabile di trasporto di persone su gomma e su rotaia. Esso non coinvolge soltanto la realtà urbana, ma anche quella extraurbana, vista la presenza di un numero apprezzabile di pendolari che da aree prevalentemente rurali raggiungono le sedi dell'ateneo giuliano, localizzate in punti diversi della città di Trieste. Lo studio è in grado di fornire utili raccomandazioni per il decisore pubblico perché quest'ultimo può comprendere quali sono le leve ed i margini di manovra per favorire l'adozione di misure in grado di ridurre la dipendenza da mezzi di trasporto endotermici, incoraggiare l'uso e la condivisione di biciclette e auto elettriche, soprattutto grazie alla diffusione di politiche informative sulle tecnologie pulite esistenti.

2. LETTERATURA RILEVANTE

Come anticipato, questo lavoro si propone di analizzare, in un'ottica di sostenibilità, la mobilità intra ed extra urbana generata dalla presenza di una struttura universitaria all'interno di un centro cittadino. Diversi sono i contributi che la letteratura fornisce per l'analisi del comportamento dei pendolari nello spostamento tra casa e lavoro e tra casa e luogo di studio. Tra di essi è opportuno richiamare quei contributi in cui viene posta l'enfasi proprio sulla sostenibilità nel comportamento di studenti, personale docente e tecnico amministrativo. Un primo autorevole contributo è fornito da Conway et al. (2008) che hanno sviluppato un metodo per calcolare l'*ecological footprint* e l'hanno applicato all'Università di Toronto presso la sede di Mississauga, in Canada, con lo scopo di evidenziare gli effetti sull'ambiente derivanti dall'uso di forme di trasporto diverse da quelle tradizionali per raggiungere il campus. Le loro simulazioni evidenziano che se il 10% degli studenti che usano l'auto da soli (senza alcun passeggero) e il 20% di quelli che impiegano il *car pooling* utilizzassero i mezzi pubblici vi sarebbe un decremento dell'*ecological footprint* del 5%. Se, invece, il 50% degli studenti dei due gruppi sopra citati passasse al trasporto pubblico, la riduzione dell'*ecological footprint* sarebbe maggiore, raggiungendo infatti il 25%.

L'importanza dell'attuazione di misure volte a favorire la riduzione dell'uso del mezzo privato e l'adozione di quello pubblico, della bicicletta e di altre modalità sostenibili è stata in seguito sottolineata da contributi che hanno descritto le politiche poste in atto da diversi atenei in differenti paesi. Una misura che pare diffusamente impiegata è quella dell'applicazione di un incremento nelle tariffe per il parcheggio dell'auto all'interno del campus. È questo il caso di Delmelle e Delmelle (2012) che hanno studiato le abitudini di mobilità degli studenti pendolari dell'Università dell'Idaho, dal cui esame emerge come il raddoppio del-

le tariffe per il parcheggio all'interno del campus sia l'opzione che determina il maggior disincentivo all'uso dell'automobile. Dall'analisi si rileva anche come le modalità non motorizzate siano più impiegate nei mesi più miti dell'anno e, vista la presenza di periodi anche piuttosto freddi, è apprezzata la disponibilità di permessi di parcheggio all'interno del campus che consentano agli studenti di cambiare modalità di trasporto in base alla stagione. Dell'Olio et al. (2014) confermano che il pagamento del parcheggio all'interno del campus dell'Università della Cantabria a Llama in Spagna è l'opzione più efficace per supportare la diffusione della mobilità sostenibile, molto di più di una riduzione del costo del biglietto del bus o del servizio di *bike sharing*.

L'incremento delle tariffe di parcheggio è richiamato come strategia promettente per il passaggio dall'uso dell'automobile al trasporto pubblico oppure all'uso di servizi navetta e di condivisione del taxi da parte di Danaf et al. (2014) che analizzano il caso dell'American University di Beirut in Libano. Un'ulteriore conferma dell'efficacia dell'incremento delle tariffe di parcheggio all'interno del campus è fornita da Becker e Carmi (2019), che hanno utilizzato un modello a scelta discreta per comprendere quali sono le motivazioni che spingono gli studenti a lasciare a casa la propria auto, attraverso un'indagine condotta presso il Tel-Hai College nel nord dell'Israele. Il loro esercizio di scelta tiene conto di diversi fattori, come l'applicazione o meno di una tariffa per il parcheggio, ma anche di fattori che caratterizzano il pendolarismo, come la consapevolezza dell'esistenza di mezzi pubblici alternativi, il tempo impiegato per raggiungere l'università attraverso il mezzo pubblico e la presenza di atteggiamenti pro-ambientali. I risultati dell'indagine evidenziano che l'aggiunta di una tariffa di parcheggio non solo aumenta la tendenza a lasciare l'auto a casa, ma influenza le motivazioni per cui si opta per questa scelta. Si rileva come i soggetti che hanno un atteggiamento ambientalista non sono influenzati, nella loro scelta di non utilizzare l'auto, dall'introduzione di una tariffa di parcheggio, diversamente da coloro che ne fanno abitualmente uso, che mutano il proprio atteggiamento per ragioni di convenienza economica.

Alcuni contributi identificano nella presenza di tariffe scontate per l'uso di mezzi pubblici, anche in forma multimodale, uno strumento efficace nel ridurre l'uso dell'auto di proprietà. È questo il caso di Zhou (2016) che analizza quali sono i diversi fattori che influenzano la scelta della modalità di spostamento da parte degli studenti universitari a Los Angeles. Lo studio mette in evidenza tre risultati principali. Il primo, e più rilevante ai fini della presente indagine, sottolinea che l'uso di un *transit pass* (titolo di viaggio multicorse valido per un predefinito periodo di tempo) agevolato per i mezzi pubblici può aumentare l'utilizzo delle modalità in cui il soggetto non guida da solo la propria auto. Il secondo evidenzia che, maggiore è il tempo necessario per recarsi all'università, maggio-

re è la probabilità di adottare un mezzo di trasporto pubblico e maggiore è il tempo trascorso su di esso. Tale tempo non è necessariamente perso, soprattutto nell'ipotesi in cui vengano forniti servizi, come il wi-fi gratuito a bordo, che consentono al passeggero di essere produttivo lavorando. Il terzo sottolinea che gli studenti maschi e quelli più giovani, i cosiddetti *undergraduate* (corrispondenti alla laurea triennale italiana) manifestano una probabilità maggiore di quelli più vecchi, i cosiddetti *postgraduate* (ovvero coloro che sono iscritti ad un corso di laurea corrispondente o superiore alla laurea magistrale), ad utilizzare la bicicletta o a muoversi a piedi. I risultati inoltre evidenziano che le studentesse dimostrano una minore propensione all'uso della bicicletta rispetto ai loro colleghi di sesso maschile, probabilmente perché avvertono un maggiore pericolo.

L'importanza di un biglietto multimodale per il trasporto pubblico a tariffe convenienti, assieme alla proprietà di una bicicletta, sono fattori determinanti per il passaggio ad una mobilità sostenibile anche secondo Moniruzzaman e Farber (2017). Gli autori si basano su informazioni provenienti da un database sulla mobilità degli studenti, che gli autori stessi affermano essere "il più grande del mondo". Ciò consente loro di studiare il comportamento di scelta della modalità di spostamento di un'eterogenea popolazione con campioni che provengono da quattro università per un totale di sette campus ubicati nell'area metropolitana di Toronto. Risultati che confermano l'importanza di prezzi scontati per l'accesso ai mezzi pubblici sono ottenuti anche da Zhou (2012) che analizza il caso di Los Angeles, città tradizionalmente caratterizzata da un ampio e pervasivo uso dell'automobile. Lo studio mostra che gli studenti non fanno un uso individuale dell'automobile con un'un'intensità maggiore rispetto ai loro colleghi che studiano in aree con diverse caratteristiche urbane. Anzi, l'indagine mette in evidenza come la multimodalità e la presenza di *transit pass* scontati favoriscono la diffusione di comportamenti virtuosi, come l'utilizzo di mezzi pubblici, il *car pooling*, ma anche l'uso della bicicletta e il semplice camminare. Tali comportamenti sono più diffusi tra le donne, tra gli studenti più giovani e si registrano quando lo studente ha una rete di amici e di compagni di corso che abitano in prossimità del luogo in cui lo studente stesso vive.

Un'ulteriore conferma dell'importanza dell'accessibilità dei prezzi dei biglietti per i mezzi pubblici è fornita da Hasnine et al. (2018) che conducono un'indagine sul comportamento di scelta della modalità di spostamento degli studenti universitari nella città di Toronto. Gli autori fanno uso di un set di dati raccolti su larga scala mediante un diario di viaggio compilato sul web dagli studenti. Oltre alla rilevanza del *transit pass*, lo studio sottolinea come il genere influenzi in modo non trascurabile le scelte di mobilità sostenibile, con le studentesse che sono più inclini all'utilizzo del *park and ride* (ovvero l'impiego dell'auto per raggiungere un punto, parcheggiare e prendere un mezzo pubblico) e del *kiss and*

ride (ovvero il potersi far accompagnare da un membro della famiglia al punto in cui prendere un mezzo pubblico) per raggiungere i campus del centro cittadino. Diversamente, le studentesse che devono raggiungere i campus suburbani manifestano una maggiore propensione ad usare l'*auto passenger* (ovvero potersi muovere con un'auto privata, diversa dalla propria, ma come passeggero).

Interessante è il lavoro di Danielis e Rotaris (2015) che, a differenza della maggior parte dei lavori che li hanno preceduti, si sono concentrati non solo sulla valutazione dell'efficacia di misure volte a incrementare la mobilità sostenibile ma ne hanno anche analizzato l'efficienza sociale. In particolare, gli autori fanno uso di dati su preferenze dichiarate e rivelate derivanti da interviste condotte su un campione di studenti, personale tecnico amministrativo e docenti dell'Università di Trieste nel 2010. Sulla base dei risultati di un modello multinomiale a parametri casuali viene realizzata un'analisi di scenario su diverse alternative modali. I risultati della simulazione mostrano che l'opzione più efficiente ed efficace è rappresentata dal sussidio all'uso del bus. Tale misura genererebbe una riduzione di quasi il 60% nell'uso dell'auto, con un beneficio sociale netto (differenza tra benefici e costi sociali) superiore ai 400 Euro. Un'opzione con minore efficacia e minore efficienza è rappresentata dalla combinazione dell'erogazione di sussidi all'uso del bus unitamente ad un prezzo relativamente conveniente del parcheggio. Contrariamente all'evidenza che abbiamo riportato poco sopra, Danielis e Rotaris (2015) rilevano che l'incremento delle tariffe di parcheggio determinerebbe un modesto (12%) calo nell'uso dell'auto privata però al prezzo di una significativa riduzione nei benefici sociali netti.

Un ulteriore importante elemento che può supportare la diffusione della mobilità sostenibile in ambito universitario è dato dalla disseminazione di informazioni relative ai benefici effetti derivanti dal ridurre l'uso dell'auto senza passeggeri. Questo aspetto è sottolineato in particolare da Becker e Carmi (2019), i quali affermano che, a fianco di campagne informative che supportano lo sviluppo di motivazioni personali alla condivisione del viaggio, sia anche necessario pubblicizzare l'utilità sociale di tali scelte. La rilevanza della dimensione informativa e della sensibilizzazione alla mobilità sostenibile è alla base delle azioni riportate nel contributo di Gurrutxaga et al. (2017) relativamente al caso dell'Università di San Sebastian, in Spagna. Gli autori, infatti, descrivono come l'università si sia dotata di un team di gestione (pagina 243) con l'obiettivo di facilitare l'uso del trasporto collettivo e di altre opzioni di trasporto a risparmio energetico, attraverso una serie di linee guida che, tra le altre, hanno incluso programmi di sensibilizzazione per tutti gli studenti e il personale, la promozione sia dell'uso della bicicletta sia della pedonalità all'interno del campus, ma anche del *car sharing* e del *car pooling* per soggetti di qualsiasi ruolo. I risultati dell'implementazione di queste misure si sono concretizzati in un incremento del *car*

pooling, che è passato dall'1,4% di tutti i viaggi dei passeggeri che accedevano al campus nel periodo 2014-2015 al 25,3%, e in un aumento del tasso medio di occupazione delle auto, passato da 1,2 a 1,7 persone per mezzo.

Infine anche Cattaneo et al. (2018) suggeriscono che informare gli studenti sui problemi ambientali aumenta la loro propensione all'uso della mobilità sostenibile. Basandosi su informazioni relative alle preferenze di trasporto di oltre 800 studenti italiani che frequentano l'Università di Bergamo, gli autori mettono in luce come rendere edotti gli studenti sul tema della mobilità sostenibile abbia determinato una riduzione media dell'uso dei trasporti privati del 5,8%, con un maggior calo che interessa i campus che non sono localizzati nel centro cittadino o nel borgo storico.

3. L'INDAGINE E I PRINCIPALI RISULTATI

Il quadro delineato nella sezione precedente fornisce supporto alla motivazione della nostra analisi. In questa sezione vengono, infatti, riportate le principali evidenze ottenute da un'indagine sulla mobilità studentesca e sulla sua sostenibilità condotta nel dicembre 2018. Il gruppo intervistato è costituito da studenti, docenti e personale tecnico amministrativo di alcuni dei Dipartimenti dell'Università di Trieste, in particolare il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche, il Dipartimento di Scienze Politiche e Sociali e il Dipartimento di Ingegneria ed Architettura, localizzati in zone diverse della città (campus di Piazzale Europa e nel centro città). Ai fini della mobilità la diversa localizzazione è rilevante, in quanto il campus di piazzale Europa presenta un dislivello circa 100 metri rispetto al centro città.

Lo strumento che il gruppo di ricerca ha deciso di impiegare per la raccolta dei dati è stato un questionario cartaceo. La somministrazione del questionario in forma cartacea ha permesso all'intervistatore di descrivere direttamente in modo verbale la natura e le finalità del progetto ai partecipanti all'indagine. L'intervistatore si tratteneva per tutta la durata della compilazione del questionario, all'inizio oppure alla fine delle lezioni, in base a quanto concordato con il docente titolare del corso (che gentilmente accordava la propria disponibilità), in modo da poter fornire supporto informativo durante la compilazione. In modo analogo, quando gli impegni del personale docente e tecnico amministrativo lo consentivano, l'intervistatore si tratteneva anche con loro, in modo tale da poter fornire spiegazioni in caso di dubbi sulle domande poste.

3.1 *Il questionario*

Il questionario destinato agli studenti è sostanzialmente identico rispetto a quello indirizzato a docenti e personale tecnico amministrativo. Allo studente è chiesto di indicare il corso di laurea a cui è iscritto e l'anno di corso, ma anche il dipartimento; quest'ultima informazione è richiesta anche al corpo docente per comprenderne l'afferenza. Agli studenti viene quindi chiesto qual è il luogo di residenza, se le lezioni si tengono nella città in cui risiedono e, in caso negativo, si cerca di comprendere se il soggetto è un pendolare oppure uno studente fuori sede, ovvero che soggiorna a Trieste durante la settimana in quanto la sua residenza è altrove (e verosimilmente ad una certa distanza dal capoluogo giuliano). Al corpo docente ed a quello tecnico amministrativo viene chiesto in modo simile a quanto chiesto agli studenti, qual è il luogo di residenza, se il luogo di lavoro è localizzato nella propria città di residenza o meno, in modo da comprendere se il soggetto intervistato si sposta meramente in un contesto urbano oppure è un pendolare che arriva da fuori città.

A queste domande di carattere preliminare seguono domande volte a comprendere quali sono i mezzi utilizzati abitualmente, ed in che ordine, per raggiungere il luogo di studio o lavoro, chiedendo all'intervistato di specificare altresì il tempo utilizzato in minuti e la distanza percorsa in chilometri. All'intervistato viene inoltre chiesto qual è il grado di importanza che attribuisce ad una serie di fattori nella scelta della modalità di trasporto. Tali fattori includono, tra gli altri, il costo, i benefici ambientali, il tempo atmosferico, la sicurezza ed il tempo impiegato. Viene quindi indagato il grado di soddisfazione della mobilità giornaliera in termini di tempo impiegato e costi sostenuti.

Successivamente viene proposta una serie di domande che mirano in modo più puntuale a cogliere il grado di sensibilità ambientale del rispondente. Tra queste si chiede all'intervistato quanto la propria mobilità incide sull'ambiente e se l'individuo sarebbe propenso all'acquisto di una bicicletta o di un'auto elettrica qualora all'università fosse presente una stazione di ricarica. Di particolare interesse è comprendere quanto gli intervistati ritengono che alcune iniziative proposte siano efficaci per incoraggiare l'uso di trasporti sostenibili per raggiungere l'università attraverso una scala Likert da 1 a 4 ad indicare livelli crescenti di efficacia. Le iniziative proposte comprendono, tra le altre, la presenza di stazioni di ricarica per auto elettriche all'università, piste ciclabili sicure, luoghi di parcheggio sicuri per biciclette, *bike-sharing*, *car-sharing*, *car-pooling*, biglietti di autobus scontati, biglietti ferroviari scontati, trasporti pubblici più frequenti. Viene inoltre valutato quanto gli intervistati ritengono essere efficaci alcuni metodi di pubblicità al fine di promuovere il trasporto sostenibile, anche in questo caso attraverso l'uso di una scala Likert da 1 a 4, ad indicare livelli crescenti di efficacia.

3.2 Risultati: evidenze descrittive sul campione di riferimento

Vengono qui riportati i risultati relativi a 267 questionari, dei quali 223 relativi a studenti e 44 riguardanti personale tecnico amministrativo e docenti. Per quanto riguarda il genere, prevale leggermente il genere maschile (55,1%). Come anticipato nella sezione precedente, gli intervistati sono stati suddivisi sulla base della loro dimora durante il periodo di studio/lavoro, secondo le seguenti tre categorie:

- a. Residenti in sede: coloro che hanno la residenza anagrafica nel luogo di studio/lavoro;
- b. Pendolari giornalieri: coloro che hanno la residenza anagrafica in un luogo diverso da quello di studio/lavoro e che giornalmente rientrano alla propria abitazione (nel comune di residenza);
- c. Fuori sede: coloro che hanno la residenza anagrafica in un luogo diverso da quello di studio/lavoro, ma che non rientrano giornalmente alla propria abitazione, soggiornando durante la settimana (o per periodi più lunghi) nella città di studio/lavoro.

La Tabella 1 mostra come prevalga nel campione la componente dei fuori sede (42,3%).

Tabella 1 – Tipologia di intervistato rispetto alla residenza durante la settimana di studio/lavoro

	NUMEROSITÀ	%
Fuori sede	113	42,3
Pendolare giornaliero	57	21,3
Residente in sede	97	36,3
Totale	267	100,0

3.2.1 I mezzi di trasporto

Per quanto riguarda i mezzi di trasporto utilizzati per raggiungere giornalmente l'università, se concentriamo la nostra attenzione solo sull'auto (propria o altrui) e sui mezzi pubblici (prevalentemente treno e autobus), si può vedere nella Tabella 2 che oltre il 34% degli intervistati utilizza giornalmente l'auto, da sola (21,3%), o congiuntamente ad un mezzo pubblico (13,1%), mentre il 37,8%

fa uso dei soli mezzi pubblici e il rimanente 27,7% non usa né l'uno né l'altro, e quindi si muove a piedi e/o in bicicletta.

Tabella 2 - Distribuzione degli intervistati secondo modalità di trasporto utilizzata giornalmente per raggiungere il luogo di studio/lavoro

	NUMEROSITÀ	%
Nè auto nè mezzo pubblico	74	27,7
Mezzo pubblico	101	37,8
Auto	57	21,3
Sia auto che mezzo pubblico	35	13,1
Totale	267	100,0

La modalità di trasporto utilizzata giornalmente è strettamente legata alla tipologia dell'intervistato rispetto alla residenza come evidenziato nella Tabella 3. In particolare i fuori sede utilizzano quasi esclusivamente il mezzo pubblico o si muovono a piedi (95,6%), mentre i pendolari giornalieri utilizzano l'auto prevalentemente come ausilio per raggiungere il luogo ove prendere un mezzo pubblico (52,6%). I residenti in sede, invece, utilizzano tutte le modalità, ma tendono ad impiegare o l'una o l'altra disgiuntamente, e solo il 5,2% di essi combina auto e mezzo pubblico per raggiungere l'università.

Tabella 3 - Distribuzione degli intervistati secondo modalità di trasporto utilizzata giornalmente e residenza. Valori percentuali di colonna

	FUORI SEDE	PENDOLARE GIORNALIERO	RESIDENTE IN SEDE	TOTALE
Nè auto nè mezzo pubblico	46,0	.	22,7	27,7
Mezzo pubblico	49,6	29,8	28,9	37,8
Auto	4,4	17,5	43,3	21,3
Sia auto che mezzo pubblico	-	52,6	5,2	13,1
Totale	100,0	100,0	100,0	100,0

A coloro che utilizzano l'auto da sola o in combinazione con un mezzo pubblico è stato chiesto se lo fanno come autista da soli, come autista con altri, o come passeggeri. L'83,3% dei 66 rispondenti ha affermato di utilizzare l'auto da soli.

La condivisione del mezzo, seppure la sua presenza sia modesta (16,7%), riguarda quasi esclusivamente i pendolari giornalieri che utilizzano anche un mezzo pubblico.

3.2.2 Sensibilità verso l'ambiente

Uno dei quesiti posti all'interno del questionario ha riguardato la percezione dell'incidenza della propria modalità di trasporto sull'ambiente. Come si legge nella Tabella 6, la maggior parte degli intervistati, circa il 67%, ritiene che le proprie modalità di trasporto giornaliero non influiscano molto (31,7%) o influiscano poco (35,1%) sull'ambiente.

È interessante notare dall'osservazione della Tabella 7 che la percezione di non influire sull'ambiente non è così diversa tra coloro che si muovono a piedi,

Tabella 4 - Distribuzione degli intervistati secondo modalità di trasporto utilizzata giornalmente e residenza. Valori percentuali di riga

	FUORI SEDE	PENDOLARE GIORNALIERO	RESIDENTE IN SEDE	TOTALE
Nè auto nè mezzo pubblico	70,3	-	29,7	100,0
Mezzo pubblico	55,4	16,8	27,7	100,0
Auto	8,8	17,5	73,7	100,0
Sia auto che mezzo pubblico	-	85,7	14,3	100,0
Totale	42,3	21,3	36,3	100,0

Tabella 5 - Modalità di utilizzo dell'auto secondo residenza degli intervistati

	AUTO DA SOLO	AUTO CON ALTRI (COME AUTISTA O PASSEGGERO)	TOTALE
Fuori sede	2	-	2
Pendolare giornaliero	20	9	29
Residente in sede	33	2	35
Totale	55	11	66
Totale %	83,3	16,7	100,0

oppure in bicicletta, da un lato (il 74,3% ritiene di non influire molto sull'ambiente), e coloro che utilizzano solo il mezzo pubblico (66%) o solo l'auto (66,7%), dall'altro. Si noti che tale percentuale passa al 52,9% per coloro che utilizzano sia l'auto sia il mezzo pubblico per lo spostamento giornaliero. Ciò è coerente con il fatto che si tratta soprattutto di pendolari giornalieri (l'85,7% di coloro che utilizzano giornalmente entrambi i mezzi di trasporto, come emerge dalla Tabella 4) e che coprono distanze maggiori rispetto alle altre tipologie di intervistati. Si noti altresì che la percezione di impattare in modo limitato sull'ambiente da parte dei rispondenti che usano l'auto dipende dal fatto che si tratta prevalentemente di soggetti residenti nel Comune di Trieste (il 73,7% di coloro che usano solo l'auto come risulta dalla Tabella 4) e che coprono quindi una distanza contenuta per raggiungere l'università. Tali rispondenti sono per la maggior parte (52,4%) personale tecnico amministrativo e docente.

Tabella 6 – Secondo lei la sua attuale mobilità influisce sull'ambiente?

	VALORI PERCENTUALI
Non molto	31,7
Un po'	35,1
Abbastanza	21,1
Molto	12,1
Totale	100,0

Tabella 7 – Percezione dell'influenza della mobilità sull'ambiente secondo modalità di trasporto utilizzata. Valori percentuali

	NO, NON MOLTO	SÌ, ABBASTANZA	TOTALE
Nè auto nè mezzo pubblico	74,3	25,7	100,0
Mezzo pubblico	66,0	34,0	100,0
Auto	66,7	33,3	100,0
Sia auto che mezzo pubblico	52,9	47,1	100,0
Totale	66,8	33,2	100,0

La Tabella 8 evidenzia come sia importante tener conto anche della diversa percezione della mobilità sull'ambiente in base al genere. Se il 33,8% dei rispondenti ritiene che la propria mobilità influenzi abbastanza o molto l'ambiente (vedi Tabella 7), è però vero che tale preoccupazione è più diffusa tra i soggetti di sesso femminile, che lo esprimono nel 40,7% dei casi, rispetto ai soggetti di sesso maschile, che, invece, lo manifestano nel 28% dei casi.

Tabella 8 – Percezione dell'influenza della mobilità sull'ambiente secondo genere. Valori percentuali

<i>Secondo lei la sua mobilità incide sull'ambiente?</i>	MASCHI	FEMMINE
Non molto	34,3	28,0
Un po'	37,5	31,4
Abbastanza	16,1	28,0
Molto	11,9	12,7
Totale	100,0	100,0

3.2.3. *Efficacia delle iniziative proposte per incoraggiare l'uso di trasporti sostenibili per raggiungere l'università*

Sono state sottoposte al giudizio degli intervistati 10 ipotetiche iniziative che potrebbero incentivare la mobilità sostenibile. La Tabella 9 riporta le distribuzioni percentuali per ciascuna delle iniziative e il voto medio. La scala adottata è una Likert che va da un minimo di 1 (non efficace) a un massimo di 4 (molto efficace) e costringe quindi il rispondente ad esprimere un giudizio positivo (3 e 4) o uno negativo (1 e 2)³. La tabella evidenzia come solo due iniziative vengano giudicate scarsamente efficaci dalla maggioranza degli intervistati e precisamente *Stazioni di ricarica per auto elettriche all'università* (da oltre il 60%) e *Tariffe di parcheggio più care (per auto)* (da circa il 73%). Entrambe queste valutazioni negative possono essere spiegate come derivanti da un vincolo: il parcheggio più caro non ridurrebbe l'uso dell'auto in quanto si tratta di un uso forzato derivante da problemi di tempo e/o non disponibili-

³ Alle diverse modalità di risposta della scala di Likert si dovrebbe a rigore attribuire un significato semplicemente ordinale. Per poterle considerare come misurate su una scala a intervalli (in questo caso da 1 a 4) e poter quindi calcolare il valore medio si deve accettare l'ipotesi addizionale di equidistanza tra le categorie. Si veda Zani e Cerioli (2007)

tà di altre modalità utilizzabili dal soggetto intervistato, mentre l'esistenza di stazioni di ricarica implica la disponibilità di un mezzo elettrico (auto, scooter, bici) la cui attuale diffusione nella realtà italiana e regionale è estremamente bassa. Le iniziative giudicate più efficaci dagli intervistati sono collegate ai trasporti pubblici, in particolare circa il 90% degli intervistati ritiene che una riduzione nel costo di tali trasporti sia efficace (iniziative 7 e 8 della Tabella 9) e oltre l'80% ritiene che lo sia anche una loro maggior frequenza (iniziativa 9 della Tabella 9). Iniziative come il *Bike-sharing*, il *Car-sharing* ed il *Car-pooling* sono invece viste con una maggiore "incertezza di giudizio", come si può desumere dal fatto che le valutazioni si sono concentrate sui due valori centrali della scala proposta.

Tabella 9 – Distribuzione degli intervistati secondo giudizio di efficacia di alcune iniziative per incoraggiare l'uso di trasporti sostenibili per raggiungere l'università. Valori percentuali (da 1 = non efficace a 4 = molto efficace)

INIZIATIVE	1	2	3	4	TOTALE	VOTO MEDIO
1. Stazioni di ricarica per auto elettriche all'università	21,3	39,9	21,3	17,5	100,0	2,35
2. Piste ciclabili (infrastrutture) sicure	8,8	23,7	36,6	30,9	100,0	2,90
3. Luoghi di parcheggio sicuro per biciclette	9,9	22,8	39,5	27,8	100,0	2,85
4. Bike-sharing	18,1	31,7	34,4	15,8	100,0	2,48
5. Car-sharing	13,8	31,4	36,0	18,8	100,0	2,60
6. Car-pooling	11,0	37,0	36,6	15,4	100,0	2,56
7. Biglietti di autobus scontati	1,5	6,1	25,4	67,0	100,0	3,58
8. Biglietti ferroviari scontati	2,3	8,1	24,8	64,7	100,0	3,52
9. Trasporti pubblici più frequenti	1,1	15,7	33,7	49,4	100,0	3,31
10. Tariffe di parcheggio più care (per auto)	38,0	34,9	19,4	7,8	100,0	1,97

Nota: le caselle evidenziate raccolgono più del 60% delle risposte per riga (l'azzurro è impiegato per indicare giudizi di inefficacia, rosa per i giudizi di efficacia e giallo per giudizi che si collocano prevalentemente nella zona intermedia).

Si possono analizzare con maggiore dettaglio i risultati riportati nella Tabella 9, distinguendo come le opzioni complessivamente meno efficaci e quelle più efficaci siano state diversamente valutate da soggetti con ruoli differenti, ovvero personale amministrativo e docenti, e studenti, studenti con diverso domicilio, e individui con diverse abitudini di mobilità. I risultati di questo approfondimento sono proposti nelle Tabelle 10 e 11 rispettivamente per le opzioni con minore e maggiore efficacia.

La Tabella 10 mostra che la stazione di ricarica per auto elettriche è considerata una misura non efficace soprattutto da rispondenti che sono studenti (il 68,3% degli studenti), pendolari (il 66,7% dei pendolari) e da coloro che si muovono con auto e con mezzo pubblico (il 74,3%). Diversamente, tale inizia-

Tabella 10 – Distribuzione dei giudizi rispetto alle categorie di intervistati: iniziative con basso livello di efficacia. Valori percentuali di riga per ciascuna iniziativa

	1. STAZIONI DI RICARICA PER AUTO ELETTRICHE ALL'UNIVERSITÀ		10. TARIFFE DI PARCHEGGIO PIÙ CARE (PER AUTO)	
	EFFICACE %	NON EFFICACE %	EFFICACE %	NON EFFICACE %
RUOLO				
Amministrativi e docenti	52,4	47,6	28,2	71,8
Studenti	36,2	63,8	26,9	73,1
<i>Totale</i>	<i>38,8</i>	<i>61,2</i>	<i>27,1</i>	<i>72,9</i>
RESIDENZA				
Fuori sede	39,3	60,7	25,2	74,8
Pendolari	33,3	66,7	16,1	83,9
Residenti in sede	41,5	58,5	36,3	63,7
<i>Totale</i>	<i>38,8</i>	<i>61,2</i>	<i>27,1</i>	<i>72,9</i>
MODALITÀ DI TRASPORTO				
Né auto né mezzo pubblico	40,5	59,5	31,5	68,5
Mezzo pubblico	37,4	62,6	31,6	68,4
Auto	47,3	52,7	15,1	84,9
Auto e mezzo pubblico	25,7	74,3	23,5	76,5
<i>Totale</i>	<i>38,8</i>	<i>61,2</i>	<i>27,1</i>	<i>72,9</i>

tiva è valutata in maniera relativamente positiva da amministrativi e docenti (il 52,4%). Le tariffe di parcheggio più care per auto, come prevedibile, sono percepite come misure inefficaci da una larga parte degli studenti, dai pendolari e da chi si muove esclusivamente in auto.

La Tabella 11 mostra in modo speculare ciò che accade per le misure che sono invece ritenute di maggiore efficacia. Osserviamo che l'offerta di biglietti di autobus scontati è apprezzata in modo trasversale da tutti i tipi di rispondenti, ma in particolare dalla quasi totalità degli studenti come rilevato anche dall'analisi di Danielis e Rotaris (2015), in particolare da quelli fuori sede e da coloro che si muovono con un mezzo pubblico. Anche l'offerta di biglietti ferroviari scontati è una misura apprezzata in modo diffuso tra eterogenee cate-

Tabella 11 – Distribuzione dei giudizi rispetto alle categorie di intervistati: iniziative con alto livello di efficacia. Valori percentuali di riga per ciascuna iniziativa

	7. BIGLIETTI DI AUTOBUS SCONTATI		8. BIGLIETTI FERROVIARI SCONTATI		9. TRASPORTI PUBBLICI PIÙ FREQUENTI	
	EFFICACE %	NON EFFICACE %	EFFICACE %	NON EFFICACE %	EFFICACE %	NON EFFICACE %
RUOLO						
Amministrativi e docenti	78,0	22,0	71,1	28,9	75,0	25,0
Studenti	95,1	4,9	92,7	7,3	84,6	15,4
<i>Totale</i>	92,4	7,6	89,5	10,5	83,1	16,9
RESIDENZA						
Fuori sede	97,3	2,7	94,6	5,4	85,7	14,3
Pendolari	93,0	7,0	91,1	8,9	83,6	16,4
Residenti in sede	86,2	13,8	82,2	17,8	79,8	20,2
<i>Totale</i>	92,4	7,6	89,5	10,5	83,1	16,9
MODALITÀ DI TRASPORTO						
Né auto né mezzo pubblico	91,9	8,1	87,8	12,2	81,1	18,9
Mezzo pubblico	98,0	2,0	99,0	1,0	87,9	12,1
Auto	81,5	18,5	75,0	25,0	76,4	23,6
Auto e mezzo pubblico	94,3	5,7	88,2	11,8	84,8	15,2
<i>Totale</i>	92,4	7,6	89,5	10,5	83,1	16,9

gorie di intervistati, ma è apprezzata maggiormente dagli studenti, ancora una volta dai fuori sede e da coloro che si muovono con un mezzo pubblico, in modo del tutto analogo (come prevedibile) rispetto all'opzione precedente. Molto simile è anche la distribuzione dei giudizi relativamente all'offerta di trasporti pubblici più frequenti. Anche in tal caso sono gli studenti ad esprimere un più alto gradimento, ancora una volta i fuori sede e sorprendentemente, seppur di poco, quelli che impiegano l'auto per spostarsi.

3.2.4 Disponibilità all'acquisto di un'auto elettrica

Agli intervistati viene anche chiesto se siano disposti ad acquistare un'auto elettrica nel caso vi sia una stazione di ricarica all'università. Circa il 30% degli intervistati si esprime in senso favorevole, come visibile dalla Tabella 12: infatti, sono soprattutto gli amministrativi e i docenti che rispondono positivamente a tale domanda (41,5%), coloro che risiedono in sede (34,0%) e coloro che raggiungono giornalmente l'università con l'auto (42,1%).

Tabella 12 – Se all'università ci fosse una stazione di ricarica comprenderebbe una bicicletta elettrica o un'auto elettrica?

	SI		NO		TOTALE	
	NUMEROSITÀ	%	NUMEROSITÀ	%	NUMEROSITÀ	%
Amministrativi e docenti	17	41,5	24	58,5	41	100,0
Studenti	61	28,2	155	71,8	216	100,0
<i>Totale</i>	<i>78</i>	<i>30,4</i>	<i>179</i>	<i>69,6</i>	<i>257</i>	<i>100,0</i>
<hr/>						
Fuori sede	31	28,7	77	71,3	108	100,0
Pendolari	15	26,8	41	73,2	56	100,0
Residenti in sede	32	34,0	61	65,6	93	100,0
<i>Totale</i>	<i>78</i>	<i>30,4</i>	<i>179</i>	<i>69,6</i>	<i>259</i>	<i>100,0</i>
<hr/>						
Né auto né mezzo pubblico	18	25,4	53	74,6	71	100,0
Mezzo pubblico	32	33,0	65	67,0	97	100,0
Auto	24	42,1	33	57,9	57	100,0
Auto e mezzo pubblico	4	12,5	28	87,5	32	100,0
<i>Totale</i>	<i>78</i>	<i>30,4</i>	<i>179</i>	<i>69,6</i>	<i>259</i>	<i>100,0</i>

La Tabella 13 mette in evidenza se l'eventuale presenza di una stazione di ricarica presso l'università possa indurre all'acquisto di una bicicletta o di un'auto elettrica, in base alla percezione che il rispondente ha dell'effetto della propria mobilità sull'ambiente. Questa esercita un effetto non trascurabile sulla scelta. Infatti coloro che rispondono in modo affermativo nel 44% dei casi pensano che la propria mobilità abbia un'influenza sull'ambiente. Diversamente, coloro che rispondono in modo negativo per oltre il 70% sono convinti che la propria mobilità non abbia un effetto importante sull'ambiente.

Tabella 13 – Disponibilità all'acquisto di un'auto elettrica secondo sensibilità all'ambiente

Percezione dell'influenza della mobilità sull'ambiente	<i>Se all'università ci fosse una stazione di ricarica compirebbe una bicicletta elettrica o un'auto elettrica?</i>					
	SI		NO		TOTALE	
	NUM.	%	NUM.	%	NUM.	%
No, non molto	43	55,9	128	71,9	171	67,1
Si, abbastanza	34	44,1	50	28,1	84	33,9
Totale	77	100,0	178	100,0	255*	100,0

* il 95,5% dei 267 intervistati ha risposto a entrambe le domande

3.2.5 Fattori rilevanti nella scelta della modalità di trasporto

Agli intervistati è stato chiesto di esprimere il proprio giudizio sul grado di importanza attribuito a 10 fattori che influiscono sulla scelta della modalità di trasporto, secondo una scala Likert che va da 1 a 4, ove 1 indica un fattore non importante e 4 un fattore molto importante.

Dalla Tabella 14 si osserva che per il personale tecnico amministrativo, il fattore che riveste l'importanza più bassa è, purtroppo, la presenza di benefici ambientali, mentre l'importanza più alta è attribuita al tempo impiegato. Diversamente, per gli studenti il percorso presenta la rilevanza più bassa, mentre il costo, il tempo impiegato e la convenienza, sono quelli che presentano lo stesso e più elevato punteggio.

In generale si nota, però, che il valore mediano è generalmente piuttosto elevato sostanzialmente per tutte le opzioni, senza differenze di rilievo tra individui che ricoprono ruoli diversi.

Tabella 14 – Importanza dei fattori sotto elencati per la scelta della modalità di trasporto, secondo ruolo universitario. Voto medio e mediano (da 1 = non importante a 4 = molto importante)

	PERSONALE TECNICO AMMINISTRATIVO E DOCENTI		STUDENTI	
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA
1. Essere rilassato	3,1	3,0	3,0	3,0
2. Salute	3,1	3,0	3,1	3,0
3. Benefici ambientali	2,5	2,0	2,9	3,0
4. Costo	2,9	3,0	3,4	4,0
5. Tempo atmosferico	2,8	3,0	2,9	3,0
6. Sicurezza	3,1	3,0	3,2	3,0
7. Affidabilità	3,3	4,0	3,3	4,0
8. Tempo impiegato	3,6	4,0	3,4	4,0
9. Convenienza	2,9	3,0	3,4	4,0
10. Percorso	2,9	3,0	2,8	3,0

La Tabella 15 mette in evidenza, invece, come l'importanza dei fattori che guidano la scelta variano in base al luogo di residenza. Coloro che risiedono a Trieste e i fuori sede (che sono coloro che alloggiano quindi a Trieste durante la settimana) attribuiscono il peso più basso ai benefici ambientali. I residenti in sede e i fuori sede presentano un ulteriore elemento di similarità, ovvero per entrambi conta molto il tempo impiegato. Diverso è il caso del pendolare giornaliero per il quale è di limitata importanza il tempo atmosferico, ma è invece rilevante la salute.

La Tabella 16 mostra, invece, l'importanza di una serie di fattori che guidano la scelta del tipo di mezzo impiegato. Come è prevedibile, chi utilizza solo l'auto attribuisce il peso più basso ai benefici ambientali e quello più alto al tempo impiegato. I rispondenti che combinano l'uso dell'auto con quello di un mezzo pubblico sono invece ben poco preoccupati del tempo atmosferico, ma prestano invece particolare attenzione al costo. Questo fattore è determinante ed in egual misura lo è l'affidabilità e il tempo impiegato, mentre lo è ben poco il percorso. Quest'ultimo presenta un livello di importanza estremamente contenuto anche per coloro che si spostano a piedi oppure in bicicletta. Per questi soggetti sono rilevanti il tempo impiegato e la convenienza (quest'ultima intesa non solo in termini economici, ma anche in termini di flessibilità d'uso).

Tabella 15 – Importanza dei fattori sotto elencati per la scelta della modalità di trasporto, secondo residenza. Voto medio e mediano (da 1 = non importante a 4 = molto importante)

	FUORI SEDE		PENDOLARE GIORNALIERO		RESIDENTE IN SEDE	
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA
1. Essere rilassato	3,1	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0
2. Salute	3,1	3,0	3,5	4,0	2,9	3,0
3. Benefici ambientali	2,9	3,0	2,9	3,0	2,7	3,0
4. Costo	3,4	4,0	3,4	4,0	3,1	3,0
5. Tempo atmosferico	3,0	3,0	2,7	3,0	3,0	3,0
6. Sicurezza	3,2	3,0	3,3	4,0	3,0	3,0
7. Affidabilità	3,4	3,5	3,4	4,0	3,2	4,0
8. Tempo impiegato	3,5	4,0	3,3	3,0	3,5	4,0
9. Convenienza	3,4	4,0	3,4	4,0	3,1	3,0
10. Percorso	2,9	3,0	2,8	3,0	2,8	3,0

Tabella 16 – Importanza dei fattori sotto elencati per la scelta della modalità di trasporto, secondo modalità di trasporto. Voto medio e mediano (da 1 = non importante a 4 = molto importante)

	NÉ AUTO NÉ MEZZO PUBBLICO		MEZZO PUBBLICO		AUTO		AUTO E MEZZO PUBBLICO	
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA
1. Essere rilassato	3,1	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
2. Salute	3,2	3,0	3,1	3,0	2,9	3,0	3,4	4,0
3. Benefici ambientali	3,1	3,0	2,8	3,0	2,5	2,0	2,8	3,0
4. Costo	3,3	4,0	3,4	4,0	2,9	3,0	3,5	4,0
5. Tempo atmosferico	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	3,0	2,6	3,0
6. Sicurezza	3,0	3,0	3,3	4,0	2,9	3,0	3,4	4,0
7. Affidabilità	3,3	4,0	3,4	4,0	3,3	3,0	3,4	4,0
8. Tempo impiegato	3,4	4,0	3,4	4,0	3,7	4,0	3,2	3,0
9. Convenienza	3,4	4,0	3,3	4,0	3,1	3,0	3,3	4,0
10. Percorso	2,9	3,0	2,7	3,0	2,9	3,0	2,7	3,0

Infine, la Tabella 17 mostra come l'importanza attribuita ai fattori che governano la scelta muti in base alla percezione che l'individuo ha dell'impatto che la propria mobilità ha sull'ambiente. I rispondenti che affermano di non produrre un impatto significativo sull'ambiente sono, coerentemente, anche coloro che nella scelta del mezzo attribuiscono al fattore "benefici ambientali" l'importanza più bassa. I rispondenti che ritengono che la propria mobilità impatti abbastanza sull'ambiente attribuiscono comunque un'importanza non particolarmente elevata ai "benefici ambientali", ma sono prevalentemente mossi da considerazioni legate all'affidabilità ed al tempo impiegato. La bassa importanza attribuita ai "benefici ambientali" nel processo di scelta modale anche da parte di chi è consapevole che la propria mobilità ha un impatto è elemento non trascurabile e sul quale è possibile ragionare per politiche volte alla sensibilizzazione del pubblico da parte dei *policy makers*.

Tabella 17 – Importanza dei fattori sotto elencati per la scelta della modalità di trasporto, secondo percezione dell'influenza della propria mobilità sull'ambiente. Voto medio e mediano (da 1 = non importante a 4 = molto importante)

	PERCEZIONE INFLUENZA MOBILITÀ SU AMBIENTE			
	NO, NON MOLTO		SÌ, ABBASTANZA	
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA
1. Essere rilassato	3,0	3,0	3,1	3,0
2. Salute	3,1	3,0	3,2	3,0
3. Benefici ambientali	2,7	3,0	3,0	3,0
4. Costo	3,3	4,0	3,2	3,0
5. Tempo atmosferico	2,9	3,0	3,0	3,0
6. Sicurezza	3,1	3,0	3,3	3,0
7. Affidabilità	3,3	4,0	3,4	3,0
8. Tempo impiegato	3,5	4,0	3,4	4,0
9. Convenienza	3,3	4,0	3,2	3,5
10. Percorso	2,8	3,0	2,9	3,0

5. ELEMENTI DI CONCLUSIONE E SUGGERIMENTI PER IL DECISORE PUBBLICO

L'analisi che abbiamo condotto su un campione di studenti, personale docente e tecnico amministrativo dell'Università di Trieste, limitatamente alle sedi ubicate nel capoluogo giuliano, ha permesso di evidenziare degli aspetti salienti riportati nelle sezioni precedenti. Tra di essi è opportuno richiamarne alcuni, in particolare legati alla sensibilità ambientale.

Abbiamo registrato che la maggior parte dei rispondenti non ritiene che la propria mobilità impatti in modo significativo sull'ambiente, un risultato trasversale rispetto alle diverse tipologie modali.

I risultati evidenziano che i rispondenti apprezzano politiche volte a sostenere la mobilità sostenibile quando queste si traducono nell'incentivazione all'utilizzo del mezzo pubblico, treno o bus, attraverso biglietti scontati o quando è prevista una maggior frequenza temporale dei mezzi. Diversamente, le misure meno efficaci sono quelle che prevedono tariffe di parcheggio più care e l'installazione di una stazione di ricarica per veicoli elettrici presso l'Università. Quest'ultima misura renderebbe però più propensi all'acquisto di un'auto elettrica quegli individui che dimostrano maggiore sensibilità ambientale.

L'analisi dell'importanza dei fattori determinanti la scelta del mezzo di trasporto evidenzia purtroppo come i benefici ambientali siano valutati con il punteggio più basso in assoluto da parte del personale tecnico amministrativo, mentre per gli studenti il giudizio non è il più basso in assoluto, ma corrisponde ad un punteggio, comunque basso, ma analogo a quello di altri fattori. Interessante è notare che sono soprattutto i residenti nel capoluogo giuliano quelli che danno minore importanza ai benefici ambientali associati alla scelta modale.

Infine, incrociando i dati relativi all'importanza attribuita ai fattori che governano la scelta con la percezione che l'individuo ha dell'impatto che la propria mobilità ha sull'ambiente, si osserva che non solo chi ritiene di impattare poco, ma anche chi dichiara di impattare in modo apprezzabile sull'ambiente effettua la propria scelta modale di fatto trascurando i benefici ambientali.

Sulla base delle evidenze sopra riportate è possibile rilevare che un passaggio verso una maggiore mobilità sostenibile per l'ateneo giuliano può passare attraverso l'ampliamento dello spettro degli interventi di natura economica che rendano più conveniente l'impiego dei mezzi pubblici sia per pendolari sia per residenti.

In una prospettiva futura, ma auspicabilmente di breve periodo, la diffusione della mobilità elettrica soprattutto attraverso biciclette e scooter elettrici potrebbe rappresentare un'interessante e valida opzione, in particolare in una città in cui i mezzi a due ruote sono molto diffusi. Per far ciò però è necessario che l'Università e la pubblica amministrazione, non solo a livello locale, continuino nell'opera di cooperazione che stanno da tempo portando avanti attraverso

iniziative comuni. Queste, a nostro parere, debbono dare largo spazio alla diffusione di informazioni sulle caratteristiche tecniche ed economiche dei mezzi elettrici e contribuire a ridurre lo stigma che spesso ancora li contraddistingue. Il decisore pubblico, inoltre, deve proseguire nell'azione di incentivazione al passaggio a mezzi elettrici attraverso sussidi al prezzo di acquisto ed al successivo mantenimento del mezzo.

- Becker, N., & Carmi, N. (2019). Changing trip behavior in a higher education institution: The role of parking fees. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(4), 268-277.
- Cattaneo, M., Malighetti, P., Morlotti, C., & Paleari, S. (2018). Students' mobility attitudes and sustainable transport mode choice. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 19(5), 942-962.
- Conway, T. M., Dalton, C., Loo, J., & Benakoun, L. (2008). Developing ecological footprint scenarios on university campuses: a case study of the University of Toronto at Mississauga. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 9(1), 4-20.
- Danaf, M., Abou-Zeid, M., & Kaysi, I. (2014). Modeling travel choices of students at a private, urban university: insights and policy implications. *Case studies on transport policy*, 2(3), 142-152.
- Dell'Olio, L., Bordagaray, M., Barreda, R., & Ibeas, A. (2014). A methodology to promote sustainable mobility in college campuses. *Transportation Research Procedia*, 3, 838-847.
- Delmelle, E. M., & Delmelle, E. C. (2012). Exploring spatio-temporal commuting patterns in a university environment. *Transport Policy*, 21, 1-9.
- Gurrutxaga, I., Iturrate, M., Oses, U., & Garcia, H. (2017). Analysis of the modal choice of transport at the case of university: Case of University of the Basque Country of San Sebastian. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 105, 233-244.
- Hasnine, M. S., Lin, T., Weiss, A., & Habib, K. N. (2018). Determinants of travel mode choices of post-secondary students in a large metropolitan area: The case of the city of Toronto. *Journal of transport geography*, 70, 161-171.
- Moniruzzaman, M., & Farber, S. (2018). What drives sustainable student travel? Mode choice determinants in the Greater Toronto Area. *International journal of sustainable transportation*, 12(5), 367-379.
- Rotaris, L., & Danielis, R. (2015). Commuting to college: The effectiveness and social efficiency of transportation demand management policies. *Transport Policy*, 44, 158-168.
- Zani, S., & Cerioli, A. (2007). *Analisi dei dati e data mining per le decisioni aziendali*, Giuffè Editore, Milano.
- Zhou, J. (2012). Sustainable commute in a car-dominant city: Factors affecting alternative mode choices among university students. *Transportation research part A: policy and practice*, 46(7), 1013-1029.
- Zhou, J. (2016). Proactive sustainable university transportation: Marginal effects, intrinsic values, and university students' mode choice. *International journal of sustainable transportation*, 10(9), 815-824.

Microgrids as drivers in the global energy transition towards renewables

MARIANGELA SCORRANO, ALESSANDRO MASSI PAVAN

1. CLIMATE CHANGE AND THE NEED TO INTERVENE

Mitigation and adaptation to climate change are key challenges of the 21st century. The global climate is changing and this is leading to increasingly serious risks for ecosystems, human health and the economy. The trend in long-term global warming is going on, or rather it is accelerating. According to the World Meteorological Organization (WMO, 2018) the 20 warmest years on record have all occurred in the past 22 years and the top 4 were in the past 4 years alone. The IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C (IPCC, 2018) claims that for the decade 2006-2015 the average global temperature was 0.86°C above the pre-industrial baseline. This digit, however, has increased to 0.93°C in the most recent decade (2009-2018), and to 1.04°C in the last five years (2014-2018). The impacts of climate change, in the form of sea level rise, more extreme weather events, floods, droughts and storms are already evident in many countries worldwide.

These changes occur because large amounts of greenhouse gases are released into the atmosphere as a result of many human activities carried out all over the world, including, among the most important, the combustion of fossil fuels for energy production, heating and transport. The use of fossil fuels also

causes the release of atmospheric pollutants harmful to the environment and human health. Energy use is by far the main source of greenhouse gas emissions due to human activity. About two-thirds of global greenhouse gas emissions are related to the use of fossil fuels for energy purposes. To be able to limit global warming, the world urgently needs to use energy efficiently, making use of the clean energy sources.

The efforts made so far globally to mitigate climate change culminated in 2015 with the Paris agreement, the first universal legally binding global climate agreement adopted by 195 countries. The goal (limiting the average global temperature increase well below 2°C, while trying to reduce it to 1.5°C, compared to pre-industrial levels) is ambitious and cannot be achieved without making a major overhaul of global energy production and consumption.

In support of the global climate agenda, the EU has adopted climate and energy targets that are binding for 2020 and proposed targets for 2030 as part of its overall efforts to move to a low-carbon economy and reduce greenhouse gas emissions of 80-95% by 2050. The first set of climate and energy targets for 2020 includes a 20% reduction in emissions (compared to 1990 levels), an energy consumption of 20% coming from renewable sources and a 20% increase in energy efficiency. The next goal of 2030 will provide for an update of these objectives: the emissions must be reduced by 40%, 27% of the energy must come from renewable sources and energy efficiency will have to increase by 27% (or 30%, according to the recent proposal of the European Commission) with respect to the reference objectives.

Renewable power and electrification technologies, therefore, have been identified as the key enablers for energy-related CO₂ emissions reductions.

Weather-related effects, as the unusually large number of hot and cold days, cause a fast increase in energy demand in the form of electricity. The latter has grown two thirds faster than energy consumption as a whole since 2000. The uptake of electric vehicles also contributed to this high use of electricity. Electricity in 2016 accounted for 19% of total final energy consumption, but its share is expected to grow. By 2050 electricity could become the central energy carrier, growing from a 20% share of final consumption to an almost 50% share – and, as a result, gross electricity consumption would more than double. But the shift towards greater electrification can play an important part in the energy transition only if it is accompanied by a decarbonization of the power sector. Renewables have emerged as the fastest growing energy source in the last decade, outpacing the growth of any other energy source, including fossil fuels (oil, coal and natural gas). Renewable power could therefore provide the greater part of global power demand (estimated in 86%).

2. THE GLOBAL ENERGY TRANSITION TOWARDS RENEWABLES

Looking at the contribution of the main sources to the global energy balance, and identifying different energy ages over time, we observe that at the age of biomass first followed the coal age, then the oil age, then that of gas and finally the nuclear age. Even though nuclear energy is a low-carbon technology, the growth prospects for nuclear energy seem limited. After rapid expansion in the 1970s and 1980s, the growth of nuclear power has slowed in the last three decades. The share of nuclear in electricity generation declined from 17% in 2000 to 10% in 2017. Around two thirds of today's nuclear power plants in advanced economies are more than 30 years old and will be shut down in the foreseeable future unless their lifetimes are extended. Some countries are building new nuclear power plants, notably China, India, Russia, and the UAE. In others, governments are planning to phase out nuclear power, as in Germany, Switzerland, Spain and South Korea. Overall, nuclear era seems today aborted. Each of these energy transitions was different, but all required at least 30 to 50 years. The last and current trend is instead characterized by an extraordinary and above all fast growth in renewables¹. Since 2012, renewables have added more new power generation capacity than conventional sources of energy. Solar power added more new capacity in 2017 than did coal, gas, and nuclear plants combined. Wind and solar now provide 6% of electricity generation worldwide, up from 0.2% in 2000. In the aggregate, renewables account for around a quarter of global electricity generation. Countries such as Denmark already generate more than half their electricity from variable renewable energy sources. In 2017, Costa Rica's electricity was generated entirely from renewable energy for 300 days. For several days in the past year, the power systems of Germany, Portugal and Denmark were able to run entirely on renewables. The trend is estimated to continue in the coming years (Scorrano and Danielis, 2018).

Many enabling trends are driving the rapid deployment of renewables.

First of all, the **widespread and rising concern about the climate crisis** caused by fossil fuels have led governments, businesses, investors and the public to recognize the need to decarbonize the global economy. **Pollution**, mainly caused by the burning of oil and coal, is making the air dangerous to breathe in many

¹ The main renewable energy sources are bioenergy, geothermal, hydropower, ocean, solar and wind. Among these, solar energy and wind power are undergoing very rapid growth, while the others are growing more gradually. Solar and wind, in particular, are variable renewable energy sources, since the amount of power they generate varies with the weather and the time of day.

cities. The World Health Organization estimates that nine out of every ten people in the world breathe polluted air that is hazardous to health and wellbeing, and that air pollution kills 7 million people every year, making it the fourth largest cause of death. Climate change poses an existential threat to humanity and the Earth's eco-systems.

Moreover, **energy sources are limited**. Global fossil fuel consumption is rising, and new reserves are becoming harder to find. Those that are discovered are significantly smaller than the ones that have been found in the past. Globally, we currently consume the equivalent of over 11 billion tonnes of oil from fossil fuels every year. Crude oil reserves are vanishing at a rate of more than 4 billion tonnes a year, and if the trend does not change, our known oil deposits would run out in just over 53 years. If we will use gas to fill the energy gap left by oil, our known gas reserves will run out too, in just 52 years. Although we have enough coal, if we increase its production as a consequence of the depletion of oil and gas, our known coal deposits could be gone in 150 years. Unlike fossil fuels, green energy made from wind and solar power is sustainable, because it is generated by resources that won't run out. For example, the energy payback for solar power technology is just two years. That means it only takes two years for a solar park to make the same amount of energy used in its manufacture and installation. And after that, it can provide decades of clean energy.

Moreover, many countries are shifting to renewables because they lack oil and gas reserves and wish to be less dependent on energy imports. Many major oil-producing countries are also setting targets for increasing the proportion of renewables in their energy mix. The United Arab Emirates' energy strategy, for example, sets an objective of 44% of renewables in its power supply and a 70% reduction in its carbon emissions by 2050. Russia auctioned 2 GW of renewables in 2017 and another 1 GW in 2018. Also local governments and municipalities have played a role in establishing renewable energy targets. California, for example, has adopted a 60% renewable electricity target by 2030, and several cities, from Mexico City to Madrid, have announced plans to ban diesel cars.

The **cost of renewable energy** has significantly **dropped** over the past years, to the point where almost every source of green energy can now compete on cost with oil, coal and gas-fired power plants. Hydroelectric power is the cheapest source of renewable energy, at an average of \$0.05 per kilowatt hour (kWh), but the average cost of developing new power plants based on onshore wind, solar photovoltaic (PV), biomass or geothermal energy is far below \$ 0.10/kWh. Not far behind is offshore wind, which costs close to \$0.13/kWh. All these fuel types are now able to compete with the cost of developing new power plants based on fossil fuels such as oil and gas, which typically range from \$0.05/kWh to over \$0.15/kWh.

Technological advances and increased investment, allowing a steep decline in costs of renewable energy and energy storage, made possible a competitive cost advantage of technologies such as solar and wind, even without subsidies. Since 2010, the average cost of electricity from solar PV and wind energy has fallen by 73% and 22% respectively. Auction prices suggest that by 2020 the average cost of electricity that is generated by solar and wind sources will be at the lower end of fossil fuel electricity costs. The cost of lithium-ion batteries, which are used in electric vehicles, has fallen by 80% since 2010. As a result of these cost declines, investments in renewable technologies are increasingly driven by competitive business models and the profit motive. Significant cost declines are expected to continue over the course of the next decade. IRENA estimates that by 2025 the global weighted average cost of electricity could fall by 26% from onshore wind, by 35% from offshore wind, by at least 37% from concentrated solar power (CSP) technologies, and by 59% from solar photovoltaics (PV). The cost of stationary battery storage could fall by up to 60%, and there is growing confidence that electric and conventional vehicles will be sold at comparable prices by the mid-2020s.

These falling costs cause the time lag between the financing of a project and its completion to be very low, below 2.3 years for all renewable sources. Solar PV projects are the quickest to construct and can be built in less than a year after financing is completed. Onshore wind **construction times** are also comparatively short, again averaging less than one year. Construction of offshore wind projects averages close to two years after financing is agreed, so a project financed in 2018 may not become operational until 2020 or beyond (IRENA and CPI, 2018). These numbers are not comparable with those typical of other energy sources. Nuclear energy, for example, requires 6 to 12.5 years to become operational.

Technological innovations, including higher solar photovoltaic (PV) module efficiencies and taller wind turbines, have played an important role in accelerating the deployment of renewables in the electricity sector, as also suggested by the increasing number of patents in clean energy fields. In the long term, next generation biofuels and renewable hydrogen generated from electrolysis may permit renewables to extend into a growing range of hard-to-electrify sectors, such as aviation, shipping and heavy industry. Innovations in digitalization and energy storage are also opening up new frontiers. New digital technologies, such as smart grids, the internet of things, big data, and artificial intelligence, are being applied in the energy industry, helping to raise its efficiency and accelerate the use of renewable energy within emerging smart generation and distribution systems.

3. THE ROLE OF PHOTOVOLTAIC

Among renewables sources, solar energy, and solar photovoltaic in particular, is experiencing the highest growth. Considering that in an hour, the sun radiates solar energy enough to cover for human energy consumption for a year, then favoring the development of solar PV modules could be essential to capture this naturally free vast amount of energy provided by nature. With respect to other renewable energy systems (e.g. wind turbines) PV modules have lower (almost negligible) operating and maintenance costs, since they have no mechanically moving parts, except in cases of sun-tracking mechanical bases. They are totally silent, consequently, they are suitable for urban areas and for residential applications. The latter, in particular, are easy to install on rooftops or on the ground without any interference to residential lifestyle. These advantages resulted in huge investments absorbed by this sector which have led to a growth that has gone from 25 GW in 2010 to 663 GW expected by the end of 2019. Solar also beats coal in new installed capacity even if the latter continues to be one of the predominant fossil sources (about 529 GW compared to 638 GW of photovoltaic).

The consequence has been a drastic reduction in solar energy modules' prices in the past years, which are expected to continue to decline in the coming years. Nonetheless, solar photovoltaic modules are one of major renewable energy systems that have been promoted through government subsidy funding, encouraging the installation of a large number of plants. This has favored the start-up of the photovoltaic market both at a global level (as regards the production of photovoltaic modules), and at a national level (as regards the construction of the plants). In turn, the increase in the number of installations and the production of modules has enabled the chain companies to achieve economies of scale and therefore a drastic drop in prices at all levels, triggering a virtuous circle and allowing the progressive reduction and finally, the cancellation of the incentive. The result has been a significant reduction in the price of installations, more than halved in the five-year period 2011-2015. This has led many countries to the so-called **grid parity** regime, which occurs when the cost of electricity produced by photovoltaics is lower than the price the user pays for buying it from the grid. This means that the final consumer (end user) will find more convenient (from the economic point of view) installing a photovoltaic system that satisfies its electricity consumption on average rather than buying electricity from the grid, even in the absence of incentives. Consumers, however, seem not fully aware of this fact. The wrong perception that photovoltaics is no longer economically viable since the era of incentives ended is confirmed by the stagnation of the growth of installations precisely at the end of the incentives. On the contrary, the convenience of photovoltaics has never been so marked, not even during the era

of incentives (Massi Pavan and Lugh, 2012), also considering the payback time and the internal rate of return. Solar modules cost is still on a fast reducing track and is expected to continue reducing for the next years – consequently solar PV modules has indeed a highly promising future both for economic viability and environmental sustainability. Considering the point of view of the energy system as a whole, instead, it is important to compare the costs of producing electricity with photovoltaics or traditional plants. When these costs are comparable, we can say that we are in a fuel parity regime; entering the fuel parity regime means that it becomes economically convenient to produce electricity through a photovoltaic system rather than a traditional plant. Italy, in particular some areas such as Sicily, represents an important example where fuel parity conditions are consolidating, mainly due to the high solar irradiation and the consequent high producibility of the plants (Massi Pavan et al., 2016). It has been calculated that the cost of the energy produced by large photovoltaic plants (so-called utility-stairs, generally dedicated only to the sale of energy and not to serve a specific user) is less than 70 euros per megawatt-hour, in line with the cost of production in plants powered by traditional sources.

4. THE MICROGRID SYSTEM

Solar energy, as all the other renewable energy sources, has an intermittent nature. No shining at night, but also cloudy or rainy weather during daytime makes solar energy modules less reliable a solution. Moreover, the amount of energy generated by the PV does not usually match the consumption profiles, forcing a demand response to reduce operating costs. However, to overcome these issues and to assure a continuous and reliable supply of electric power, especially for on-grid connections, microgrid systems are becoming promising alternatives to the central distribution paradigm (Yan et al., 2017). Microgrids are the building box of the present and future smart grids. In general, the microgrid consists of the power conditioning system, the energy storage, the loads and energy management and control system. Microgrids can operate independently (off-grid modes) or in synchronization with the electricity grid (grid-connected) ensuring the supply with local and reliable energy at all times. This means that depending on the solar adoption ratio of a microgrid and on the hour of the day, the microgrid can either import power from the grid or export power to the grid.

Microgrids keep the power flowing by disconnecting – or islanding – from the central grid when it begins to fail. The microgrid's batteries then serve customers until power is restored on the central grid. Other ancillary services to the central grid refer to support functions, such as frequency control and spinning reserve.

A benefit closely related to electric reliability is the energy resilience. While reliability is about keeping the power on, resilience describes the ability to avoid power outages in the first place or to recover quickly if they do occur. Microgrids are hence able to coordinate the match between the supply side and the demand side, increasing the renewable energy penetration. The electricity produced by PV plants can be directly consumed or, in case of excess of production, fed into the grid or stored in an energy storage. Microgrids, therefore, contribute to integrate these renewables into the energy mix. Moreover, the efficient management of energy supply guarantee cost savings, by selling energy and services back to the grid. This gives consumers a new kind of control in energy markets. They no longer just consume energy, but also can produce and control it through their microgrids. Such customers are called prosumers. Advanced microgrids are also able to leverage the daily energy prices fluctuation on its customers' behalf. When demand for grid energy is high and grid prices increase, the microgrid controller may signal to use more of its own resources to avoid paying the higher prices.

An empirical evidence (Massi Pavan et al., 2019) is the microgrid financed by "MUSE – Cross-border collaboration for a sustainable and energetically efficient university mobility", a project cofinanced by the European Regional Development Fund via the cross-border cooperation program Interreg Italy-Slovenia. It is a grid-connected microgrid consisting of a PV system installed on the rooftop of a university building (University of Trieste, Italy), an energy storage system, and a charging station for electric vehicles. More specifically, the microgrid consists of a 3.9 kW_p photovoltaic generator, a 4.6 kVA inverter, a 10 kWh lithium iron phosphate battery, an interface board performing the connection with the low voltage 230 V grid, and a 22 plus 22 kW charging station. An Energy Management System is used to monitor, control, and optimize the performance of the different components of the microgrid, though inputs given by some external references (meteorological forecasts, electricity price, etc.). Finally, an outdoor 55" display shows in real time the main parameters of the plant. When considering a storage battery and simulating the electric vehicle load profile, hence detecting both the time and the amount of energy needed for the charging, Massi Pavan et al. (2019) find that 72% of the requested energy comes from the solar generation (60% of the energy flows from the storage to the electric vehicle, and 12% from PV plant to the electric vehicle) and thus renewable.

CONCLUSIONS

The transformation of the global energy system that we are already witnessing in the power sector needs to accelerate substantially to meet the objectives of

the Paris Agreement. These require to limit the rise in average global temperatures “well below” 2°C and ideally to limit warming to 1.5°C, compared to pre-industrial levels. To this aim, the focus should be paid on energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions, which make up around two-thirds of global greenhouse gas emissions. Electrification, in particular, is emerging as a key solution for reducing emissions but only if paired with clean electricity, which increasingly can be sourced at the lowest cost from renewable energy. The renewables’ boom is leading the current energy transition, with the photovoltaics as the standard bearer. Grid-parity and fuel-parity represent a fundamental step in the growth path (globally at record rates) of this solar technology. The abatement margins linked to economies of scale, the reduction of BOS (balance of the system) and third-generation technologies guarantee enormous potential for the global growth. Microgrids are able to overcome the downside of solar energy of generating power only when sun shines. Hence, they balance the variable output of renewable energy with traditional generation assets with no human intervention. A microgrid benefits its customers and society in many ways. It provides efficient, low-cost, clean energy, enhances local resiliency, and improves the operation and stability of the regional electric grid. Through sophisticated, automated energy management, a microgrid can bolster clean energy use and can create economic value for customers — as well as the broader grid. Finally using a microgrid promotes local control, leading to the so called democratization of energy and the rise of the prosumer.

REFERENCES

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). *Global Warming of 1.5 °C*, Special Report IPCC
- IRENA (2019), *Global energy transformation: A roadmap to 2050* (2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA and CPI (2018), *Global Landscape of Renewable Energy Finance, 2018*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Massi Pavan, A, Lughì, V. (2012). Photovoltaics in Italy: Toward grid parity in the residential electricity market. In *2012 24th International Conference on Microelectronics (ICM)* (pp. 1-4). IEEE.
- Massi Pavan, A., Lughì, V., Scorrano, M. (2019). Total Cost of Ownership of electric vehicles using energy from a renewable-based microgrid. In *2019 IEEE Milan PowerTech* (pp. 1-6). IEEE.
- Massi Pavan, A., Sulligoi, G., Lughì, V., Pauli, F., Miceli, R., Di Dio, V., Viola, F. (2016). Leading the way toward fuel parity in photovoltaics: The utility-scale market in Sicily, Italy. In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 1-5). IEEE.
- Scorrano, M., Danielis, R. (2018). Scenari futuri del mix elettrico in Europa e in Italia: un'applicazione del modello ARIMA per l'analisi delle serie storiche. *Energia e innovazione tra flussi globali e circuiti locali*, 103.
- World Meteorological Organization (WMO) (2018). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018*.
- Yan, J., Zhai, Y., Wijayatunga, P., Mohamed, A. M., Campana, P. E. (2017). Renewable energy integration with mini/microgrids. *Applied Energy*, 201, 241-244.

Abstracts

ROMEO DANIELIS

La decarbonizzazione dei trasporti: è un obiettivo possibile?

Il contributo discute il tema della decarbonizzazione dei trasporti, analizzando per i diversi modi di trasporto le tendenze attuali e quelli previste per il futuro. Illustra inoltre le politiche finora messe in atto e ne valuta comparativamente l'efficacia dal punto di vista della riduzione delle emissioni di CO₂. Le conclusioni sono piuttosto pessimiste. È valutata come poco probabile la possibilità di ottenere nei tempi previsti la decarbonizzazione dei trasporti in modo tale da raggiungere al 2050 gli obiettivi di contenimento della temperatura a 1,5° o 2°. Pur non escludendo che il procedere dell'innalzamento della temperatura convinca sempre più persone, e quindi governi, a operare scelte coraggiose, al momento impopolari, maggiori speranze sono riposte nei progressi della tecnologia che permettano di sostituire gli attuali mezzi di trasporto basati su motori alimentati da combustibili fossili con veicoli elettrici e a idrogeno alimentati da energia elettrica prodotta con fonti rinnovabili.

The paper discusses the issue of decarbonising transport, analyzing current and future trends for the different modes of transport. It also illustrates the policies so far implemented and comparatively evaluates their effectiveness in terms of reducing

CO₂ emissions. The conclusions are rather pessimistic. The possibility of obtaining the decarbonisation of transports in such a way as to reach 2050 targets for containing the temperature at 1.5 ° or 2 ° is deemed unlikely. Although the increase in temperature increase might convince more and more people, and therefore governments, to make courageous choices, greater hopes are placed in technological innovations that might allow us to replace the current means of transport based on engines powered from fossil fuels with electric and hydrogen vehicles powered by electricity produced from renewable sources.

LUCIA ROTARIS

Cambiamento climatico da trasporto aereo: dimensioni del problema e soluzioni proposte

Il riscaldamento climatico rappresenta un tema di rilevanza crescente nel dibattito pubblico nazionale ed internazionale. Il settore dei trasporti gioca un ruolo rilevante nella produzione dei gas ad effetto serra. Il trasporto aereo, in particolare, presenta tassi di crescita allarmanti dovuti anche alla crescente offerta delle compagnie "low cost" ed all'aumento della domanda espressa dai mercati emergenti. Il lavoro illustra i costi sociali del cambiamento climatico e le soluzioni proposte dalla teoria economica per mitigarne l'impatto con un focus particolare sul settore avionico.

The global warming debate is growing both nationally and internationally. The transport sector plays an important role in the production of greenhouse gases. Air transport, in particular, is characterized by alarming growth rates due to the growing supply of low-cost airlines and the increased demand of emerging markets. The paper illustrates the social costs of climate change and the solutions proposed by the economic theory to mitigate its impacts with a particular focus on the avionics sector.

MARIANGELA SCORRANO, TULLIO GREGORI

The impact of trade, urbanization and biomass energy consumption on CO₂ emissions: results from a panel of emerging and frontier countries

Il contributo analizza la relazione di lungo periodo tra emissioni di CO₂, biomasse, PIL, urbanizzazione, apertura commerciale ed il consumo di energia in un

panel bilanciato di 21 paesi emergenti e di frontiera per il periodo 1973-2014. A questo scopo, indaghiamo la causalità (secondo l'approccio di Granger) a lungo termine tra le variabili in esame applicando un modello ARDL, dopo aver verificato le proprietà di stazionarietà delle serie storiche analizzate. I nostri risultati mostrano che esiste una relazione di cointegrazione tra inquinamento, PIL pro capite, grado di apertura commerciale e consumo totale di energia. Le emissioni di CO₂, come atteso, sono associate positivamente al consumo di energia, alla crescita economica e all'apertura degli scambi internazionali. Al contrario, l'uso di energia da biomassa e l'urbanizzazione sono correlati negativamente alle emissioni di CO₂. L'analisi di causalità rivela che solo l'apertura commerciale e l'urbanizzazione sono esogene, mentre le altre variabili sono determinate endogenamente. Pertanto, nei paesi emergenti e di frontiera, l'urbanizzazione sembra ridurre sia la crescita energetica sia economica, nonché l'inquinamento, mentre l'apertura commerciale svolge un ruolo opposto.

The paper investigates the long-run relationship among CO₂ emissions, biomass and waste, economic growth, urbanization, trade openness and energy consumption in a balanced panel of 21 emerging and frontier countries over the period 1973-2014. We first check the stationarity properties of the time-series under investigation. Then, we adopt an ARDL model to shed light on long-run Granger causality among the abovementioned variables. We find that there exists a cointegrated relationship between environmental degradation, per capita GDP, trade openness, and total energy consumption. CO₂ emissions are, as expected, positively associated with energy consumption, economic growth as well as trade openness. On the contrary, biomass energy use and urbanization are negatively associated with CO₂ emissions. Causality analysis reveals that only trade openness and urbanization are exogenous variables, while the others are endogenously determined. Hence, in emerging and frontier countries, urbanization appears to reduce both energy and economic growth as well as pollution, while trade openness plays an opposite role.

SAIFUL HASAN, THOR-ERIK SANDBERG HANSEN, TERJE ANDREAS MATHISEN
A review of the academic literature on Electric Vehicles in the social sciences

Con il recente sviluppo tecnologico dei veicoli elettrici, la letteratura accademica sull'argomento si è diffusa anche nell'ambito delle scienze sociali. Lo scopo di questo capitolo è duplice. Innanzitutto, esamina lo sviluppo storico della ricerca accademica sui veicoli elettrici. In secondo luogo, identifica i contributi più importanti sull'argomento. L'analisi sistematica della letteratura viene utiliz-

zata per identificare e classificare la letteratura accademica sull'EV. Sono stati identificati e inclusi nelle analisi articoli scientifici scritti in inglese e pubblicati su riviste di scienze sociali elencate nella banca dati Scopus tra il 1995 e il 2018, contenenti il termine "veicoli elettrici". Presentiamo lo sviluppo temporale dell'evoluzione della letteratura su EV. Vengono discussi gli argomenti di ricerca relativi ai veicoli elettrici che sono più frequentemente trattati, nonché quelli su cui la ricerca è carente. Le nostre analisi individua gli articoli più influenti sull'EV che è opportuna che sia i ricercatori che i politici conoscano. C'è stato sia un aumento in termini quantitativi dell'attenzione sulle EV sia una crescita relativa rispetto ad altre aree di ricerca nell'ambito delle scienze sociali. Il termine "ambiente" è stato l'argomento più frequente analizzato. Per quanto riguarda gli argomenti poco studiati, è stata prestata relativamente meno attenzione, ad esempio, al "comportamento". Ciò potrebbe essere alquanto preoccupante, considerato l'obiettivo politico dichiarato in molti paesi di aumentare la quota di mercato dei veicoli elettrici.

With the recent technological development of mass market commercial electric vehicles (EVs), academic literature on the topic has been emerging also within the social sciences. The aim of this chapter is twofold. First, it examines the historical development of academic research on EVs. Second, it identifies the seminal works on the topic. Systematic literature review is used to identify and classify the academic literature on EV. Scientific articles written in English and published in social science journals listed in the Scopus data-base between 1995 and 2018, containing the term "electric vehicles" were identified and included in the analyses. We present a timeline on the evolution of the literature on EV. Research topics related to EVs that is most frequently covered as well as the under-research topics in the existing literature are discussed. Our analyses find out the most influential articles on EV, to which both researchers and policymakers ought to familiarise themselves with. There has been both an absolute increase in the research focus on EV and a growth relative to other research areas within the social sciences. "Environment" was the most frequent topic. With respect to under-researched topics, relatively less attention has been given to for example "Behaviour" than other topics related to EV. This can be somewhat of a concern given the stated policy objective in many countries to increase the EV market share.

Il passaggio verso una più ampia adozione di auto elettriche rappresenta una delle strade per raggiungere con successo la decarbonizzazione dei trasporti. Questo obiettivo è di particolare rilievo perché il trasporto su strada è responsabile di più del 20% delle emissioni totali di gas effetto serra in Italia, ed è anche la principale causa di rilascio di particolato nell'atmosfera. Il livello di penetrazione delle auto elettriche in Italia è però ancora molto basso e rappresenta lo 0,5% sul totale delle immatricolazioni per il periodo che va dall'inizio di gennaio 2019 fino alla fine di ottobre dello stesso anno. La nostra ricerca mira a far luce su quali sono le barriere che frenano l'acquisto di un'auto elettrica da parte di un potenziale consumatore. Dai dati raccolti attraverso un questionario somministrato in Italia nel luglio 2019 ad un campione rappresentativo della popolazione italiana risulta che le tre principali preoccupazioni sono la presenza di una densità insufficiente di stazioni di ricarica veloci, il prezzo d'acquisto e la difficoltà ad utilizzare l'auto elettrica in autostrada per mancanza di infrastrutture. Diversamente, sicurezza, rischio tecnologico, accelerazione e piacere di guida non sono considerate barriere da oltre la metà dei rispondenti. L'ipotesi di indipendenza tra le barriere e alcune caratteristiche socio-economiche, verificata attraverso il test chi-quadro, è rigettata per il numero più alto di barriere quando viene considerato il genere, il reddito, il grado di istruzione, la conoscenza dell'auto elettrica e la partecipazione ad associazione ambientale.

È stato quindi realizzato uno sforzo di riduzione del numero delle barriere attraverso due modalità, la prima mediante un cluster gerarchico che porta all'identificazione di sette gruppi di barriere, la seconda attraverso l'analisi delle componenti principali che ha portato alla scelta delle prime due componenti, interpretabili la prima come una barriera generica all'acquisto dell'auto elettrica e la seconda relativa ai possibili impatti ambientali. Infine, abbiamo condotto un'analisi cluster sugli individui che ci ha consentito di raggruppare i rispondenti in quattro categorie, ovvero gli avversi, i perplessi, gli incerti ed i favorevoli.

The shift to a larger adoption of electric cars represents one of the avenues to achieve successful results in the decarbonization process of transportation. This is particularly relevant since road transportation accounts in Italy for more than 20% of total greenhouse gas emission and is the main contributor of the release of particulate matter. Yet, the level of ECs' uptake in Italy is still very modest, reaching 0.5% of total car registrations between January and October 2019. Our research aims to shed light on the potential consumer point of view to understand which are

the barriers that hamper her\him from purchasing an electric car. Relying on data stemming from a questionnaire administered in Italy in July 2019 to a representative sample of the national population, we are able to identify a ranking of concerns. The presence of an insufficient density of charging stations for electric cars, the purchase price and the difficulty in using an electric car in a highway rank as the most important barriers. Conversely, safety, technological risk, acceleration and driving pleasure are not considered as barriers by more than half of respondents. The hypothesis of independence between the barriers and selected socio-economic features, verified by the chi-squared test, is rejected in a larger number of barriers for gender, income, level of education, electric car knowledge and participation to environmental association. We attempt to reduce the number of barriers in two different ways, i.e. first, by performing a hierarchical cluster analysis which identifies seven groups, second, by undertaking a principal component analysis based on the polychoric matrix of correlations, which highlights two components. The first component identifies a general aversion towards the electric car, whilst the second is related to the doubts on the environmental benefits associated with the use of the electric car. We also perform a cluster analysis on the individuals, which allows us to group the respondents into those that are adverse, perplexed, uncertain, and favorable to electric cars.

MARIANGELA SCORRANO

Esiste un mercato per gli scooter elettrici in Italia? Evidenze da un'indagine sulle preferenze dichiarate

Gli scooter rappresentano una scelta conveniente e sempre più diffusa per gli spostamenti nelle aree urbane. Le loro dimensioni e manovrabilità consentono di superare molti limiti propri delle automobili, soprattutto nelle città più densamente popolate, caratterizzate da elevati livelli di congestione del traffico e spazi limitati per i parcheggi. Sono però molto rumorosi e soprattutto inquinanti. La crescente preoccupazione per le conseguenze dannose dell'inquinamento, e la consapevolezza dell'urgenza di intervenire, portano a considerare i sistemi di propulsione alternativi, ed in particolare l'alternativa elettrica, come una strategia chiave per puntare ad un sistema di trasporto sostenibile. Dopo aver evidenziato vantaggi e svantaggi degli scooter elettrici rispetto ai tradizionali a benzina, il contributo mira a valutarne le prospettive di mercato sulla base di un'indagine di preferenza dichiarata. Si analizza in particolare il caso studio di Trieste per comprendere, attraverso la stima di modelli della famiglia Logit (multinomiale e misto), le principali determinanti nella scelta di uno scooter e l'impatto che il

grado di conoscenza, l'esperienza pregressa, e la sensibilità ai temi ambientali hanno sulle preferenze dei consumatori per uno scooter elettrico rispetto ad uno tradizionale. I risultati ottenuti sono poi stati utilizzati per valutare l'impatto che l'introduzione dell'Ecobonus e innovazioni tecnologiche possono avere sulla probabilità di scelta, e quindi, sul grado di diffusione degli scooter elettrici.

Scooters are a convenient and increasingly popular choice for travel in urban areas. Their size and maneuverability allow to overcome many of the car's limitations, especially in the most densely populated cities, characterized by high levels of traffic congestion and limited parking spaces. However, they are very noisy and above all polluting. The growing concern about the harmful consequences of pollution, and the awareness of the urgency to intervene, lead to consider alternative propulsion systems, and in particular the electric alternative, as a key strategy to aim at a sustainable transport system. After highlighting the advantages and disadvantages of electric scooters compared to the traditional petrol-powered ones, the paper aims to assess their market prospects on the basis of a stated preference survey. The paper analyses the case study of Trieste to understand the main determinants in the choice of a scooter and the impact that the self-declared level of knowledge, the previous experience, and the sensitivity to environmental issues have on consumers' preferences for an electric scooter compared to a traditional one. The estimates obtained adopting models of the Logit family (multinomial and mixed) have been then used to assess the impact that the introduction of the Ecobonus purchase subsidy and technological innovations may have on the probability of choosing electric scooters, and therefore on their potential uptake.

ADRIANA MONTE, MARCO GIAN SOLDATI

Evidenze sulle abitudini modali e sulla sostenibilità dei trasporti in ambito accademico. Il caso dell'Università di Trieste

La promozione di una mobilità universitaria sostenibile coerente con un'efficiente allocazione energetica è oggi di particolare importanza come anche testimoniato da numerose iniziative europee progettuali in questa direzione. In questo senso, lo scopo di questo studio è comprendere quali sono le abitudini di mobilità degli studenti, dei docenti e del personale tecnico amministrativo dell'Università di Trieste, con particolare enfasi sulla sensibilità ambientale espressa dalla comunità universitaria. Per far questo tra Novembre e Dicembre 2018 abbiamo somministrato un questionario ad un campione di 267 rispondenti, dei quali 223 sono studenti, mentre i restanti 44 fanno parte del corpo docente o impiegati

come tecnici amministrativi. Il questionario ha permesso di raccogliere informazioni sui percorsi giornalieri ed i mezzi impiegati, sulla sensibilità ambientale, ma ha anche permesso di identificare il grado di efficacia che il rispondente attribuisce ad una serie di ipotetiche politiche a supporto della mobilità sostenibile. Abbiamo distinto le categorie dei rispondenti in pendolari giornalieri, residenti in sede e fuori sede. Per ciò che attiene le abitudini di mobilità i risultati evidenziano che i pendolari giornalieri utilizzano l'auto come mezzo ausiliario per raggiungere un punto ove poi prendere il mezzo pubblico. Diversamente i soggetti che risiedono a Trieste, ed anche vi lavorano o studiano, tendono ad utilizzare tutte le modalità di trasporto proposte, a differenza anche di coloro che, quasi tutti studenti, sono residenti in un comune diverso dal capoluogo giuliano, che usano esclusivamente mezzi di trasporto pubblico, oppure vanno a piedi. Circa un terzo dei rispondenti è convinto che l'impatto della propria mobilità sull'ambiente sia contenuto e, evidenza che vale sorprendentemente, a prescindere dal mezzo di trasporto impiegato per i propri spostamenti. I rispondenti affermano che le politiche più efficaci per favorire la mobilità sostenibile sono date dall'offerta di biglietti del bus o del treno a prezzi scontati, unitamente ad una maggiore frequenza del trasporto pubblico. Diversamente, l'installazione di una stazione di ricarica per auto elettriche e l'introduzione di una tariffa più cara per le auto vengono indicate come le misure meno efficaci. Nonostante ciò quasi un terzo dei rispondenti afferma che comprerebbe un'auto elettrica se ci fosse una stazione di ricarica all'università. I fattori che influenzano maggiormente la scelta di un mezzo di trasporto rispetto ad uno alternativo sono prevalentemente legati al suo costo ed al tempo di viaggio, mentre i vantaggi ambientali ricoprono purtroppo la posizione più bassa. Esiste comunque eterogeneità sui nell'importanza attribuita ai fattori tra i diversi rispondenti, in base al luogo di residenza, al mezzo di trasporto impiegato, e tra studenti e personale docente e tecnico amministrativo.

The promotion of a sustainable university mobility consistent with an efficient energy allocation is today of particular relevance as witnessed by a number of European initiatives set up in this direction. In this respect, the scope of our study is to understand which are the mobility habits of students, academic and administrative staff members of the University of Trieste placing particular emphasis to the environmental awareness of the university community. To do this we administered between November and December 2018 a questionnaire to a sample of 267 respondents, 223 of them are students, whilst 44 are academics and white collar employees. The questionnaire collects information on daily travel patterns, sensitivity to environmental issues and respondents' agreement on the level of efficacy of a set of measures targeted to foster sustainable mobility. We observe that daily commuters

use the car as an auxiliary means to reach a place where taking a public means of transportation. Conversely, respondents who reside and either work or study in Trieste tend to employ all modalities, but in a disjoint manner, whilst interviewees, especially students, who do not reside in Trieste, but live in the city during the week, employ almost exclusively a public means of transportation, or they walk. Circa one third of respondents are convinced that the impact of their mobility on the environment is limited, surprisingly in a similar fashion for respondents employing different means. The interviewees also state that the most effective policy to foster sustainable mobility would be to offer discounted bus or train tickets, as well as a higher frequency in the routes of public means. Conversely, setting up a charging station for electric cars and introduce higher parking fares for cars are ranked as the least effective, but, surprisingly almost a third of respondents said they would be inclined to buy an electric car if there were a charging station at the university. The factors that affect the most the choice of a means with respect to an alternative are primarily related its cost and its travel time, with environmental advantages placed at the bottom of the ranking. Heterogeneity, however, exists, on the latter aspect amongst respondents according to the place of residency, means of transportation used, and between a student or a member of the academic or administrative staff.

MARIANGELA SCORRANO, ALESSANDRO MASSI PAVAN

Microgrids as drivers in the global energy transition towards renewables

Contrastare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici rappresenta una sfida chiave del 21° secolo. L'uso di combustibili fossili per la produzione di energia, il riscaldamento e i trasporti, è la causa principale delle grandi quantità di gas serra rilasciati nell'atmosfera, responsabili dell'attuale riscaldamento globale. Per limitare le conseguenze dannose dei cambiamenti climatici, il mondo ha urgente bisogno di utilizzare l'energia in modo efficiente, utilizzando fonti di energia pulite. Il contributo descrive l'attuale transizione energetica, in cui l'elettrificazione sta emergendo come una soluzione chiave per ridurre le emissioni, ma solo quando accompagnata da energia pulita, sempre più prodotta a costi minori da fonti rinnovabili. Il contributo illustra i principali trend che stanno guidando il boom delle rinnovabili, con il fotovoltaico che funge da portabandiera. Grid-parity e fuel-parity rappresentano un passo fondamentale nel percorso di crescita (a livello globale a tassi record) di questa tecnologia solare. Il contributo introduce poi le microreti come un sistema in grado di bilanciare la produzione variabile di energia rinnovabile con le attività di generazione tradizionali, contribuendo

anche a integrare queste energie rinnovabili nel mix energetico. Esse forniscono energia pulita, efficiente, a basso costo, migliorano la resilienza locale ed il funzionamento e la stabilità della rete elettrica regionale.

Mitigation and adaptation to climate change are key challenges of the 21st century. Combustion of fossil fuels for energy production, heating and transport, is the main cause of the large amounts of greenhouse gases released into the atmosphere, responsible of the current global warming. To limit the damaging consequences of the climate change, the world urgently needs to use energy efficiently, making use of clean energy sources. The paper describes the current energy transition, where electrification is emerging as a key solution for reducing emissions, but paired with clean electricity, increasingly sourced at the lowest cost from renewable energy. The paper illustrates the main trends that are driving the rapid deployment of renewables, with the photovoltaics as the standard bearer. Grid-parity and fuel-parity represent a fundamental step in the growth path (globally at record rates) of this solar technology. The paper then introduces microgrids as systems able to balance the variable output of renewable energy with traditional generation assets, also contributing to integrate these renewables into the energy mix. They provide efficient, low-cost, clean energy, enhances local resiliency, and improves the operation and stability of the regional electric grid.

Authors

ROMEO DANIELIS

è professore ordinario di Economia Applicata presso l'Università degli Studi di Trieste. Insegna Economia dei settori produttivi, Transport Economics and Logistics e Economia dei mercati e delle imprese. L'attività di ricerca è incentrata sui modelli input-output ambientali, sull'economia e politica dei trasporti, sulla valutazione dei costi esterni, sull'analisi della domanda di trasporto, sui modelli a scelta discreta e sui modelli di costo totale dei veicoli elettrici.

MARCO GIAN SOLDATI

è ricercatore a tempo determinato di tipo A in Economia Applicata presso il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche "Bruno de Finetti" dell'Università degli Studi di Trieste. I suoi interessi di ricerca includono l'economia dei trasporti e la mobilità elettrica in particolare, la relazione tra commercio internazionale e accesso al credito delle piccole e medie imprese, e la macroeconomia applicata. Ha insegnato Microeconomics, Economia Internazionale, Economia dei Settori Produttivi ed è titolare del corso Monetary and Financial Policy presso l'Ateneo triestino per l'anno accademico 2019/2020.

TULLIO GREGORI

è professore associato in Politica Economica presso il Dipartimento di Scienze Politiche e Sociali dell'Università degli Studi di Trieste ove insegna Macroeconomia e Politica Economica Internazionale nei corsi di Laurea triennale e magistrale in Scienze internazionali e diplomatiche. I suoi ambiti di ricerca sono relativi all'economia internazionale, alle scelte innovative delle piccole e medie imprese che operano nei mercati internazionali nonché ai problemi legati alle scelte energetiche.

SAIFUL HASAN

is a doctoral research fellow in transport economics at Nord University Business School. His research work includes analyses of different aspects of the transition towards electric mobility using quantitative methods. Topics of special interests are policy measures and car owners' behavioral aspects.

ALESSANDRO MASSI PAVAN

è ricercatore e professore aggiunto di elettrotecnica presso il Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Ha un'esperienza ventennale nel campo delle energie rinnovabili ed è stato Responsabile dell'Ingegneria di una delle più importanti multinazionali a livello mondiale del settore fotovoltaico. I temi di ricerca principali di cui si occupa riguardano la mobilità elettrica, i sistemi di stoccaggio dell'energia elettrica, le microreti e il fotovoltaico.

TERJE ANDREAS MATHISEN

is full professor in Economics at Nord University, Business School and the vice dean of research and development at the same institution. He teaches in Transport economics and Applied Microeconomics. His research interests include competition policy, market regulation, cost analysis and pricing, mainly within the transport industry.

ADRIANA MONTE

è ricercatore universitario in Statistica Economica presso il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche "Bruno de Finetti" dell'Università degli Studi di Trieste. Si è occupata di ricerche socio economiche applicate, su varie tematiche. Le linee più recenti di ricerca sono relative al benessere e applicazioni di metodologie statistiche per lo studio della mobilità sostenibile. Attualmente è docente di Metodi Statistici per l'Analisi Socio Eco-

nomica nel Corso di Laurea Magistrale in Economia dei Settori Produttivi e dei Mercati Internazionali, e di Serie Storiche Economiche nel Corso di Laurea in Statistica e Informatica per l'Azienda, la Finanza e l'Assicurazione, presso l'Università di Trieste.

ANDREA PARMA

è sistemista informatico presso il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche dell'Università degli Studi di Trieste.

LUCIA ROTARIS

è professore associato di Economia Applicata presso l'Università degli Studi di Trieste. Insegna Transport Economics and Logistics, Microeconomics e Industrial Organization. Si occupa di analisi della domanda di trasporto, valutazione delle politiche dei trasporti e valutazione monetaria di beni pubblici.

THOR-ERIK SANDBERG HANSEN

is an associate professor at Nord University Business School, where he also obtained his PhD. His main research interests lie in applying economic models and theories on issues related to transportation, higher education, and on scientific research.

MARIANGELA SCORRANO

è assegnista di ricerca in Economia Applicata presso il Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche dell'Università degli Studi di Trieste, dove insegna Microeconomia e Financial Economics. È dottore di ricerca in "Assicurazione e Finanza: Matematica e Gestione". Si occupa di mobilità elettrica, di analisi della domanda di trasporto, di modelli a scelta discreta, di modelli di costo totale dei veicoli elettrici, di integrazione tra mobilità elettrica e fonti di energia rinnovabile attraverso l'utilizzo di microgrid. Tra gli interessi di ricerca figurano anche le analisi empiriche con dati panel relative al legame tra commercio internazionale, energia ed inquinamento.

Nel 2018 le emissioni di CO₂ a livello mondiale sono state pari a 37,1 gigatonnellate, con una tendenza ancora in crescita. Siccome a tale aumento si associa un progressivo innalzamento della temperatura media del pianeta, gli accordi di Parigi sui cambiamenti climatici stipulati nel 2015 e firmati da 184 paesi mirano a ridurre le emissioni di CO₂ al fine contenere l'aumento della temperatura nel 2050 a livello di 1,5 (massimo 2,0) gradi superiori ai livelli preindustriali.

Per realizzare questi obiettivi è necessario che tutti i settori di attività economica e produttiva contribuiscano a ridurre i loro attuali livelli di emissioni. Tra questi, il settore trasporti ha una grande responsabilità in quanto nel 2018 ha emesso 6,4 gigatonnellate di CO₂, pari a poco meno del 20% del totale. Ciò è legato al fatto che il settore dei trasporti è quasi esclusivamente dipendente da combustili fossili (per circa il 93%), in particolare di quelli derivanti dal petrolio, utilizzati per alimentare i motori a combustione interna dei veicoli con effetti avversi sia a livello locale (inquinamento atmosferico) sia a livello globale (le emissioni di CO₂).

Gli elementi di preoccupazione si accrescono ulteriormente osservando che, mentre a livello complessivo le emissioni totali di CO₂ calano, in diverse aree del mondo le emissioni del settore dei trasporti aumentano sia in termini relativi che in termini assoluti.

