



Conseguenze del bando alle vendite di auto con motore a combustione interna in Europa

Consequences of the ban on sale of internal combustion engine cars in Europe

Paolo FERRARI

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.03.2023.ART.1.>)

Sommario - Questo articolo studia le conseguenze dell'imposizione del bando alle vendite di auto dotate di solo motore a combustione interna (MCI) deciso dal Parlamento della Unione Europea. Utilizzando un modello dinamico di ripartizione della circolazione fra auto MCI e auto elettriche, si è mostrato che queste conseguenze dipendono sostanzialmente dall'atteggiamento verso l'auto elettrica dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni da un lato e dei possessori di auto MCI dall'altro. La combinazione di atteggiamenti favorevoli, sia dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni sia dei possessori di auto MCI, conduce, in seguito alla imposizione del bando, alla rapida scomparsa delle auto MCI dalla circolazione. La conseguenza nel caso di combinazione di atteggiamenti sfavorevoli è invece la permanenza in circolazione di auto MCI oltre il termine che si sarebbe verificato in assenza di divieti.

1. Introduzione

Una recente decisione del Parlamento della UE [10] prevede il bando alla vendita delle auto dotate di solo motore a combustione interna (MCI) a partire dal 2035. Lo scopo di questo provvedimento è la progressiva riduzione della circolazione delle auto MCI nei territori della UE a partire da quella data, e la sua sostituzione con auto non inquinanti a livello locale, essenzialmente auto elettriche, anche se non sono queste le sole non inquinanti a livello locale, fino alla sua definitiva scomparsa.

È importante tenere presente, per valutare le conseguenze di tale iniziativa, alle quali sono state dedicate diverse ricerche [4][5][14], che la progressiva eliminazione dalla circolazione delle auto MCI, in seguito al bando alla loro vendita, è un processo in cui intervengono numerosi fattori, fra i quali molto importanti, oltre al costo, sono l'offerta di energia elettrica per alimentare le auto elettriche, e la dotazione di infrastrutture per la ricarica delle batterie, oltre all'atteggiamento dei possessori di auto MCI, costretti fra l'altro a modificare l'organizzazione quotidiana in seguito alla sostituzione della propria auto.

Summary - This paper studies the consequences of the imposition of the ban on sale of internal combustion engine cars (ICE) decided by the Parliament of the European Union. By using a dynamical model of the circulation split between ICE cars and electric cars it has been shown that these consequences essentially depend on the attitude to the electric car of Government and Public Administrations on the one hand, and of the ICE owners on the other. The combination of favourable attitude of both Governments and ICE car owners leads, after the ban imposition, to quick disappearance of ICE cars from circulation. Instead the consequences in the case of unfavourable attitude is the permanence in circulation of ICE cars beyond the threshold that have occurred in the absence of ban.

1. Introduction

A recent decision of the Parliament of the European Union [10] includes the ban on sale of cars equipped with only internal combustion engine (ICE) starting from 2035. The purpose of this measure is the progressive reduction of the circulation of ICE cars in the European territories and their replacement with locally non-polluting cars, essentially electric cars – even if the latter are not the only locally non-polluting cars – until its final disappearance. It is important to take into account, in order to assess the consequences of this measure, to which several researches [4][5][14] have been dedicated, that the progressive removal from circulation of ICE cars, following the ban on their sale, is a process in which several factors intervene, among which, besides the cost, the supply of electricity to power electric cars and the infrastructural equipment to charge batteries are very important, along with the attitude of the ICE car owners, who are forced among other things to change their daily organization following the replacement of their car.

In order to evaluate the importance of the electricity supply we can start from the consideration that, as a study of NISSAN [3] shows, the average mileage of an electric car in Europe is 14,000 km per year, while the average consumption of an electric car is 0.2 kWh per km, so that the

Al fine di valutare l'importanza dell'offerta di energia elettrica si può partire dalla considerazione che, come risulta da uno studio eseguito dalla NISSAN [3], la percorrenza media di un'auto elettrica in Europa è 14.000 km all'anno, mentre il consumo medio di un'auto elettrica è 0.2 kWh per km, per cui il consumo medio annuo è 2.800 kWh. Dai dati raccolti da ACEA [1] risulta che nel 2020 hanno circolato nei territori della UE $246.3 \cdot 10^6$ auto. Si ha quindi che, per sostituire le auto circolanti nei territori della UE nel 2020, in grandissima parte auto MCI, con auto esclusivamente elettriche, sarebbe stata necessaria un'offerta di energia elettrica pari a $2.8 \cdot 246.3 \cdot 10^9$ kWh = 689.64 TWh. Considerando che il consumo totale di energia elettrica nei paesi della UE nello stesso anno 2020 è stato 2.329 TWh [11], la percentuale di offerta supplementare di energia elettrica sarebbe stata $689.64/2,329 = 0.296$ (per questi numeri si veda anche [8]). Questo aumento di circa il 30% sarebbe d'altra parte dovuto derivare da fonti rinnovabili, perché altrimenti la sostituzione di auto MCI con auto elettriche non avrebbe senso.

Per avere un'idea dell'entità dell'incremento nella dotazione di infrastrutture di ricarica delle batterie necessario per sostituire le auto MCI con auto elettriche, comprendenti veicoli BEV e PHEV, si consideri che nel 2020 erano presenti nei territori della UE 314.000 stazioni di ricarica [2][16], corrispondenti ad una dotazione di $(246.3 \cdot 10^6) / (314 \cdot 10^3) = 784$ auto per stazione di ricarica se tutte le auto MCI fossero state sostituite con auto elettriche da ricaricare mediante rete elettrica.

Da queste considerazioni si ricava che il raggiungimento dell'obiettivo del bando alla vendita di auto MCI richiede una sostanziale modifica sia nell'offerta di energia elettrica sia nella dotazione di infrastrutture di ricarica. D'altra parte l'incremento nel tempo di queste ultime è strettamente legato a quello dell'offerta di energia elettrica. Uno scarso valore di quest'ultima causerebbe una riduzione del flusso di elettricità alle stazioni di ricarica, allo scopo di evitare problemi alla rete elettrica generale, e ciò costituirebbe un disincentivo all'aumento del numero delle stazioni di ricarica.

Una insufficiente offerta di energia elettrica e di infrastrutture di ricarica creerebbe problemi agli utenti di auto elettriche e influirebbe sul processo di trasferimento dalla mobilità MCI a quella elettrica. Un altro fattore che influisce su questo trasferimento è l'atteggiamento dei possessori di auto MCI, in particolare l'entità della loro avversione al rischio: se questa è bassa si tende a conservare per lungo tempo la propria vecchia auto MCI, sottovalutando il rischio di frequenti e costosi interventi di manutenzione oltre agli oneri derivanti dai limiti imposti alla circolazione delle auto MCI che accompagnano il bando alla loro vendita.

Allo scopo di scoprire il modo in cui l'offerta di energia elettrica e di infrastrutture di ricarica, e l'atteggiamento dei possessori di auto MCI influisce su questo processo di trasferimento, questo articolo presenta un modello dinamico di evoluzione nel tempo del numero di auto MCI in

yearly average consumption is 2,800 kWh. We have from the data collected by ACEA [1] that $246.3 \cdot 10^6$ cars circulated in the territories of EU in 2020. Thus we have that, to replace the cars circulating in the territories of EU, in most part ICE cars, with purely electric cars, a supply of electricity equal to $2.8 \cdot 246.3 \cdot 10^9$ kWh = 689.64 TWh would have been necessary. Considering that the total consumption of electricity in EU countries in the same year 2020 was 2,329 TWh [11], the percentage of additional supply of electricity would have been $689.64/2,329 = 0.296$ (for these numbers see also [8]). On the other hand this about 30 percent increase should have come from renewable sources, as otherwise the replacement of ICE cars would not have sense.

To have an idea of the extent of the increase in the battery charging equipment that would be necessary to replace ICE cars with electric cars, inclusive of BEV and PHEV vehicles, consider that in 2020 there were 314,000 charging stations [2][16] in the territories of EU, corresponding to an equipment of $(246.3 \cdot 10^6) / (314 \cdot 10^3) = 784$ car per charging station, if all ICE cars were replaced with electric cars to be charged via electric network.

We derive from these considerations that the achievement of the objective of the ban on sale of ICE cars needs a substantial change in both the electricity supply and the charging equipment. On the other hand the increase over time in the latter is closed linked to that of the electricity supply. A low value of the latter would cause a decrease in the electricity flow to the charging stations, in order to avoid problems to the general electric network, and that would be a disincentive to the increase in the number of charging stations.

An insufficient supply of electricity and of charging infrastructures would cause problems to users of electric cars and would affect the process of the shift from the ICE mobility to the electric one. Another factor that affects the shift is the attitude of ICE owners, in particular the value of their risk aversion: if the latter is low, they tend to keep their old car for a long time, underestimating the risk of frequent and expensive maintenance, in addition to charges deriving from ICE car traffic restrictions that would accompany the ban on their sale.

In order to know the way in which the supply of electricity and of charging infrastructures, and the attitude of ICE car owners affect this shift process, this paper presents a dynamic model of evolution over time of the number of ICE cars in circulation after the ban on their sale. The model considers, among other things, that both for economic reasons and low confidence in a sufficient provision of infrastructures for battery charging, only a little fraction of ICE car owners who have identified an electric car preferable to the ICE car they possess, actually replace the latter.

The model is presented in the next Section. Then it is applied in Section 3 to the study of the evolution over time of the number of ICE cars in circulation, after the imposition of the ban on their sale, in the set of the six European countries that are the top buyers of electric cars in Europe, in order to know the way in which the circulation of ICE cars

circolazione, successivamente alla imposizione del bando alla loro vendita. Il modello tiene conto tra l'altro del fatto che, sia per ragioni di carattere economico, sia per scarsa fiducia nella sufficiente dotazione di infrastrutture per la ricarica delle batterie, solo una piccola frazione dei possessori di auto MCI, che hanno individuato un'auto elettrica preferibile a quella MCI da essi posseduta, effettivamente sostituiscono quest'ultima.

Il modello è presentato nella prossima Sezione. Esso viene quindi applicato nella Sezione 3 allo studio dell'evoluzione nel tempo del numero di auto MCI in circolazione, dopo l'imposizione del bando alla loro vendita, nell'insieme dei sei paesi europei che risultano essere i maggiori acquirenti di auto elettriche in Europa, allo scopo di individuare il modo con cui evolverebbe in un caso reale la circolazione delle auto MCI al variare dell'offerta di energia elettrica e della dotazione di infrastrutture per la ricarica delle batterie, e come tale evoluzione dipenda dall'atteggiamento dei possessori di auto MCI. Infine nella Sezione 4 è presentato un sommario dei punti principali e sono avanzate alcune conclusioni.

2. Un modello per studiare le conseguenze della imposizione del bando alla vendita delle auto MCI

Consideriamo un territorio in cui circolano due tipologie di auto: auto MCI, dotate di solo motore a combustione interna, e auto elettriche, comprendendo fra queste anche le ibride. Il modello studia l'evoluzione del numero delle due tipologie di auto circolanti nel territorio durante due sequenze di intervalli temporali unitari (della durata per esempio di un anno) i cui numeri d'ordine individuano la sequenza dei tempi t : una sequenza Σ_1 in cui non è imposto alcun vincolo alla vendita di auto MCI, ed una successiva sequenza Σ_2 in cui la vendita di auto MCI è vietata. Supponiamo che il numero complessivo T^t di auto circolanti al tempo t nel territorio in un intervallo temporale unitario aumenti nel tempo col tasso r^t tendendo ad un valore asintotico K . Il tasso r^t diminuisce nel tempo al crescere di T^t e tende a zero quando T^t si approssima a K . Indicando con \bar{r} il valore iniziale di r^t , corrispondente ad un valore nullo di T^t , si ha che l'evoluzione nel tempo di T^t è data dalla seguente equazione:

$$T^{t+1} = T^t [1 + \bar{r}(1 - T^t / K)] \quad (1)$$

2.1. Evoluzione dei numeri delle due tipologie di auto circolanti nella sequenza Σ_1

Indichiamo come tempo iniziale $t = 0$ della sequenza Σ_1 quello in cui è introdotta sul mercato l'auto elettrica. Etichettando con **1** le auto MCI e con **2** le auto elettriche, indichiamo con x_1^t e x_2^t le proporzioni di T^t al tempo t della sequenza Σ_1 composte rispettivamente da auto MCI ed elettriche, per cui i corrispondenti numeri di auto circolanti sono $x_1^t T^t$ e $x_2^t T^t$.

in Europe would evolve in a real case as the supply of electricity and the provision of charging infrastructures vary, and how this evolution depends on the attitude of ICE owners. Lastly, a summary of the main points is presented and some conclusions are put forward in Section 4.

2. A model to study the consequences of the imposition of the ban on sale of ICE cars

Consider a territory in which two typologies of cars circulate: ICE cars, equipped only with internal combustion engine, and electric cars, including among them the hybrid as well. The model studies the evolution of the numbers of the two typologies of cars circulating in the territory during two sequences of unit time intervals (e.g. one year), whose order numbers identify the sequence of times t : a sequence Σ_1 in which no ban is imposed on the sale of ICE cars, and a sequence Σ_2 in which the sale of ICE cars is banned. Suppose that the overall number T^t of cars circulating at time t in the territory in an unit time interval increases over time with rate r^t tending to an asymptotic value K . Rate r^t decreases over time as T^t increases and tends to zero when T^t approaches K . Denoting as \bar{r} the initial value of r^t , corresponding to a zero value of T^t , we have that the evolution over time of T^t is given by the following equation:

$$T^{t+1} = T^t [1 + \bar{r}(1 - T^t / K)] \quad (1)$$

2.1. Evolution of the numbers of the two typologies of cars circulating in sequence Σ_1

*We denote as $t = 0$ the initial time of sequence Σ_1 in which the electric car is introduced on the market. Labelling with **1** the ICE cars and with **2** the electric cars, we denote as x_1^t and x_2^t the proportions of T^t at time t of sequence Σ_1 composed by ICE and electric cars respectively, so that the corresponding numbers of circulating cars are $x_1^t T^t$ and $x_2^t T^t$.*

Consider an individual who at time t of sequence Σ_1 examines the possibility to buy a car. He evaluates advantages and disadvantages of the various types of cars placed on the market. Many factors intervene in the evaluation [9], among which: a) relation between vehicle performance on the one hand, purchase price and operating cost on the other; b) level of knowledge of potential buyers of the technical characteristics of the vehicle; c) reliability of vehicle components; d) problems relative to the charging of electric car batteries; e) environmental context, in particular attitude of Public Administrations, so far supportive of electric cars. We can imagine that the potential buyer summarizes his evaluations by assigning a number, with the same criterion for all potential buyers, to each type (plug-in, plug-in hybrid, hybrid) and to each model of electric cars, and to each type (gasoline and diesel) and to each model of ICE cars. The higher the number is, the less preferable the vehicle is. Then he compares the two types of ICE and electric cars to which he assigned the minimum number in the sets of ICE cars and electric cars respectively, and chooses the electric car if this number resulted less for the electric car.

Consideriamo un individuo che al tempo t della sequenza Σ_t prende in considerazione l'idea di comperare un'auto. Egli valuta vantaggi e svantaggi dei vari tipi di auto MCI ed elettriche offerti sul mercato. Nella valutazione intervengono numerosi fattori [9], fra i quali: a) relazione fra prestazioni del veicolo da un lato, prezzo di acquisto e costo di esercizio dall'altro; b) livello di conoscenza da parte del potenziale compratore delle caratteristiche tecniche del veicolo; c) affidabilità dei componenti; d) problemi relativi alla ricarica delle batterie delle auto elettriche; e) contesto ambientale, in particolare l'atteggiamento delle Pubbliche Amministrazioni, finora molto favorevoli all'auto elettrica. Possiamo immaginare che il potenziale compratore sintetizzi le sue valutazioni attribuendo un numero, con lo stesso criterio per tutti i potenziali compratori, a ciascun tipo (plug-in, plug-in ibrido, ibrido) e a ciascun modello di veicolo elettrico, e a ciascun tipo (a benzina e diesel) e a ciascun modello di auto MCI. Più alto è il numero meno preferibile è il tipo di auto. Pone quindi a confronto i due tipi di auto MCI ed elettrica a cui ha attribuito il minimo numero negli insiemi di auto MCI ed elettriche rispettivamente, e sceglie l'auto elettrica se tale numero risulta minore per l'auto elettrica.

Le valutazioni di un potenziale compratore di un'auto elettrica, che è un prodotto innovativo, sono dominate dall'incertezza, la cui importanza nei processi di diffusione delle innovazioni è documentata da una vasta letteratura sull'argomento [15][17][21][23]. L'incertezza è dovuta essenzialmente alla mancanza di conoscenza circa le potenzialità del nuovo prodotto e la sua capacità di soddisfare le esigenze di chi lo adotta. È massima al tempo in cui il prodotto è immesso sul mercato, e diminuisce man mano che la diffusione aumenta, perché contemporaneamente cresce la conoscenza delle sue potenzialità, acquisita attraverso le opinioni di coloro che l'hanno acquistato e lo utilizzano [19]. In questo compito di diffusione della conoscenza un ruolo fondamentale è giocato dagli *opinion leaders*, in primo luogo i mass media, i quali presentano i vantaggi del nuovo prodotto a quei componenti del contesto sociale che non hanno l'inclinazione o la capacità di mantenersi al corrente delle più recenti informazioni sulle innovazioni e sono quindi disposti ad ascoltare i loro consigli [19].

L'incertezza crea insicurezza: data la generale avversione al rischio [18][20], il potenziale compratore tende ad attribuire ad un'auto che si propone di acquistare un numero tanto più elevato quanto maggiore è l'incertezza. Poiché le valutazioni sono disperse nella popolazione dei potenziali compratori, dipendendo dalle caratteristiche psicologiche e socio-economiche di ciascuno di essi, e anche dall'ambiente circostante, i numeri attribuiti ai diversi tipi di auto sono variabili aleatorie. Indichiamo con C_1^t e C_2^t le medie dei numeri minimi attribuiti alle auto MCI ed elettriche, rispettivamente, e denominiamo tali medie rispettivamente costo delle auto MCI ed elettriche. Supponendo che i numeri attribuiti ai vari tipi di auto MCI ed elettriche rispettivamente siano variabili aleatorie di Gumbel indipendenti con parametro di scala uguale a 1, è

The evaluations of a potential buyer of an electric car, which is an innovative product, are dominated by uncertainty, whose importance in the processes of the diffusion of innovations is documented by a large literature on the subject [15][17][21][23]. Uncertainty is due essentially to lack of knowledge about the potential of the new product and of its ability to meet the needs of those who buy it. It is maximum at time when the product is placed on the market, and it decreases as sales increase, for at the same time the knowledge of its potential grows, acquired through the opinions of those who bought it and use it [19]. In this task of knowledge diffusion a substantial role is played by the opinion leaders, mainly the mass media, which present the potential of the new product to those components of the social context who do not have the inclination or the capability to remain abreast of the most recent information about innovations, so they instead take the advice of the opinion leaders [19].

Uncertainty causes insecurity: given the general risk aversion [18][20], the potential buyer tends to attribute to a car he intends to buy a higher number the greater uncertainty is. As the evaluations are dispersed in the population of potential buyers, depending on the psychological and socio-economic characteristics of each of them, and on the surrounding environment as well, the numbers attributed to the various types of cars are random variables. We denote as C_1^t and C_2^t the averages of the minimum numbers attributed to ICE cars and to electric cars, respectively, and name these averages cost of ICE cars and of electric cars, respectively. Supposing that the numbers attributed to the various types of ICE cars and electric cars are independent Gumbel random variables, with scale parameter equal to 1 it has been proved in [12] that the probability that the potential buyer chooses the electric car is given by:

$$P_2^t = \frac{1}{1 + \exp(C_2^t - C_1^t)} \quad (2)$$

For the reasons examined above, C_1^t and C_2^t are increasing function of uncertainty, which decreases as the car diffusion increases. Thus C_1^t and C_2^t are decreasing functions of the number of ICE cars and electric cars, respectively, in circulation. We can think that cost is very high for electric cars at the beginning of the diffusion process, since uncertainty is very high, and it decreases more or less rapidly as the number of electric cars in circulation increases. Instead, for ICE cars cost diminishes slightly as the number of cars in circulation increases, as their potential is known for a long time, and thus uncertainty is very low. Since the potential buyers do not know the number of cars that will circulate in the year in which they make their choice, the model assumes that uncertainty that accompanies their evaluations on each typology of cars is decreasing function of the corresponding number of cars circulating the previous year. It follows that costs C_1^{t+1} and C_2^{t+1} at time $t+1$ are decreasing functions of the numbers $x_1^t T^t$ and $x_2^t T^t$ of ICE cars and electric cars, respectively, circulating at time t : $C_1^{t+1} = c_1(x_1^t T^t)$, $C_2^{t+1} = c_2(x_2^t T^t)$. We name $c_1(x_1^t T^t)$ and $c_2(x_2^t T^t)$ cost functions

stato provato in [12] che la probabilità che il potenziale compratore scelga l'auto elettrica è data da:

$$P_2^t = \frac{1}{1 + \exp(C_2^t - C_1^t)} \quad (2)$$

Per le ragioni viste sopra, C_1^t e C_2^t sono funzioni crescenti dell'incertezza, la quale diminuisce al crescere della diffusione delle auto. Pertanto C_1^t e C_2^t sono funzioni decrescenti del numero di auto MCI ed elettriche, rispettivamente, in circolazione. È lecito pensare che per le auto elettriche il costo sia molto alto all'inizio del processo di diffusione, cioè all'inizio della sequenza Σ_1 , perché molto grande è l'incertezza, e diminuisca più o meno rapidamente al crescere del numero di auto elettriche in circolazione. Invece per le auto MCI il costo diminuisce poco all'aumentare delle auto in circolazione, perché le loro potenzialità sono note da molto tempo, e quindi l'incertezza è molto bassa. Poiché i potenziali compratori non conoscono il numero di auto che circoleranno nell'anno in cui fanno la loro scelta, il modello assume che l'incertezza che accompagna le loro valutazioni circa ciascuna tipologia di auto è funzione decrescente del corrispondente numero di auto circolanti nell'anno precedente. Da ciò segue che i costi C_1^{t+1} e C_2^{t+1} al tempo $t+1$ sono funzioni decrescenti dei numeri $x_1^t T^t$ e $x_2^t T^t$ di auto MCI ed elettriche, rispettivamente, circolanti al tempo t : $C_1^{t+1} = c_1(x_1^t T^t)$, $C_2^{t+1} = c_2(x_2^t T^t)$. Chiamiamo $c_1(x_1^t T^t)$ e $c_2(x_2^t T^t)$ funzioni di costo, e attribuiamo ad esse l'espressione di funzione esponenziale discendente:

$$c_i(x_i^t T^t) = a_{i,0} + a_{i,1} \exp(a_{i,2} x_i^t T^t) \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

dove $a_{1,2} < 0$.

Quindi si ha dalla (2) che la probabilità P_2^{t+1} che al tempo $t+1$ venga scelta l'auto elettrica si scrive come segue:

$$P_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (4)$$

dove $x_1^t = 1 - x_2^t$.

Indichiamo con \bar{x}_2^t la frazione di T^{t+1} che sarebbe composta da auto elettriche se tutti i potenziali compratori, che hanno scelto l'auto elettrica, effettivamente la comprassero. P_2^{t+1} è una buona stima della proporzione di auto elettriche vendute. Assumendo con accettabile approssimazione che quest'ultima si possa confondere con la proporzione \bar{x}_2^t di auto elettriche circolanti, si ha dalla (4):

$$\bar{x}_2^t = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (5)$$

È da considerare che, a causa dell'incertezza circa il futuro, riguardante per esempio la dotazione di infrastrutture per la ricarica delle batterie e l'affidabilità nel tempo

and attribute to them the expression of descending exponential function:

$$c_i(x_i^t T^t) = a_{i,0} + a_{i,1} \exp(a_{i,2} x_i^t T^t) \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

where $a_{1,2} < 0$.

Thus we have from Eq. (2) that probability P_2^{t+1} that at time $t+1$ the electric car is chosen is written as follows:

$$P_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (4)$$

where $x_1^t = 1 - x_2^t$.

Denote \bar{x}_2^t as the fraction of T^{t+1} that would be composed of electric cars if all the buyers who have chosen the electric car actually bought it. P_2^{t+1} is a good estimate of the proportion of cars sold. Assuming with acceptable approximation that the latter can be confused with the proportion \bar{x}_2^t of circulating electric cars, we have from Eq. (4).

$$\bar{x}_2^t = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (5)$$

We have to consider that, because of uncertainty about the future concerning e.g. the provision of infrastructures for charging the batteries and the reliability over time of the electric car, only a fraction of those who consider the latter preferable to an ICE car actually buy it. It follows that $x_2^{t+1} - x_2^t$ is only a fraction of $\bar{x}_2^t - x_2^t$, so that we have:

$$x_2^{t+1} = x_2^t + \beta(\bar{x}_2^t - x_2^t) \quad (6)$$

where parameter β , $0 < \beta < 1$, which we suppose to be constant, is the ratio of the difference $x_2^{t+1} - x_2^t$ between the proportions of electric cars circulating at times t and $t+1$ to the difference $\bar{x}_2^t - x_2^t$ that would occur if all those who have considered the electric car preferable to an ICE car actually bought it. β can be considered a measure of the confidence of potential buyers in the future of the electric car: the higher is the confidence, the greater is β .

The iterated application of Eq. (6), starting with the initial values x_2^0 of x_2^t , and T^0 of T^t , furnishes the time sequences of proportions x_2^t and $x_1^t = 1 - x_2^t$ of electric cars and ICE cars, respectively, in circulation, and those of the numbers $x_1^t T^t$ and $x_2^t T^t$ of ICE cars and electric cars in circulation, where the values of T^t are given by Eq. (1).

2.2. Evolution of the numbers of the two typologies of cars circulating in sequence Σ_2

Consider at this point the owner of an ICE car who, at time t of sequence Σ_2 in which the sale of ICE cars is banned, examines the various types of electric cars placed on the market in order to evaluate the convenience of replac-

dell'auto elettrica, solo una frazione di coloro che considerano quest'ultima preferibile ad un'auto MCI effettivamente l'acquistano. Da ciò segue che $x_2^{t+1} - x_2^t$ è solo una frazione di $\bar{x}_2^t - x_2^t$, per cui si ha:

$$x_2^{t+1} = x_2^t + \beta(\bar{x}_2^t - x_2^t) \quad (6)$$

dove il parametro β , $0 < \beta < 1$, che supponiamo sia costante, è il rapporto tra la differenza $x_2^{t+1} - x_2^t$ delle proporzioni di auto elettriche circolanti ai tempi t e $t + 1$ e la differenza $\bar{x}_2^t - x_2^t$ che si realizzerebbe se tutti coloro che hanno ritenuto l'auto elettrica preferibile ad una MCI effettivamente l'acquistassero. β può essere considerato una misura della fiducia dei potenziali compratori nel futuro dell'auto elettrica, la quale è tanto maggiore quanto più elevato è β .

La iterata applicazione della (6), a partire dal valore iniziale x_2^0 di x_2^t , e T^0 di T^t , fornisce la sequenza temporale delle proporzioni x_2^t e $x_1^t = 1 - x_2^t$ di auto elettriche e auto MCI in circolazione e quella dei numeri $x_1^t T^t$ e $x_2^t T^t$ delle auto MCI ed elettriche circolanti, dove i valori di T^t sono dati dalla (1).

2.2. Evoluzione dei numeri delle due tipologie di auto circolanti nella sequenza Σ_2

Consideriamo a questo punto il proprietario di un'auto MCI il quale al tempo t della sequenza Σ_2 , nella quale è vietata la vendita delle auto MCI, esamina i vari tipi di auto elettriche offerte sul mercato allo scopo di valutare la convenienza di sostituire la sua auto MCI con il tipo di auto elettrica che a lui appare più idonea. Per fare ciò egli opera un confronto fra le due auto valutandone le rispettive caratteristiche: a) costo monetario, difficoltà di ricarica delle batterie e affidabilità dell'auto elettrica; b) costo di manutenzione, stato di usura e conseguente affidabilità della sua auto MCI. Possiamo immaginare che per operare questo confronto, come nel caso dei decisori della sequenza Σ_1 , egli attribuisca un numero alla sua auto e ai vari tipi di auto elettriche offerte sul mercato. Più alto è il numero peggiori sono le sue valutazioni. Poiché queste valutazioni sono disperse nella popolazione dei possessori di auto MCI, dipendendo dalle loro caratteristiche psicologiche e socio-economiche, i numeri attribuiti alla propria auto e alle auto elettriche sono determinazioni di variabili aleatorie.

Sia Θ_2 l'insieme dei vari tipi di auto elettriche offerte sul mercato e sia m il loro numero. Sia $a^t - \eta^t$ il numero attribuito alla propria auto MCI e siano $b_i^t - \eta_i^t$, $i = 1..m$, i numeri attribuiti ai vari elementi dell'insieme Θ_2 , dove a^t è la media dei numeri attribuiti dai vari possessori di auto MCI alla propria auto e b_i^t sono le medie dei numeri attribuiti ai vari tipi di auto elettriche, mentre η^t e η_i^t , $i = 1..m$, sono variabili aleatorie identicamente e indipendentemente distribuite con media nulla.

Per prendere la sua decisione il possessore di un'auto MCI pone a confronto la propria auto con il tipo di auto

ing his ICE car with the type of electric car which seems to him the most suitable. To do that he makes a comparison between the two cars evaluating the respective characteristics: monetary cost, difficulty charging the batteries and reliability of the electric car; maintenance cost, state of wear and consequent reliability of his ICE car. We can imagine that to make this comparison, as in the case of the decision makers of sequence Σ_1 , he attributes a number to his car and to various types of electric cars placed on the market. The higher the number is, the worse his evaluations are. As these evaluations are dispersed in the population of ICE car owners, depending on their psychological and socio-economic characteristics, the numbers attributed to his car and to electric cars are determinations of random variables.

Let Θ_2 be the set of the various types of electric cars placed on the market and let m be their number. Let $a^t - \eta^t$ be the number attributed to his ICE car and let $b_i^t - \eta_i^t$, $i = 1..m$, be the numbers attributed to the various elements of the set Θ_2 , where a^t is the average of the numbers attributed to their car by the various ICE owners, and b_i^t are the averages of the numbers attributed to the various types of electric cars, while η^t and η_i^t , $i = 1..m$, are identically and independently distributed random variables with zero mean.

To make his decision the owner of an ICE car compares his car with the type of electric car to which he has attributed the minimum number in set Θ_2 , and chooses the latter if it results to be preferable. This event occurs if the minimum among the numbers attributed to the various elements of set Θ_2 results to be less than number $a^t - \eta^t$ attributed to his car, that is $\min_{\forall i} (b_i^t - \eta_i^t) < a^t - \eta^t$, that is $\max_{\forall i} (-b_i^t + \eta_i^t) > -a^t + \eta^t$. Thus the probability of the event is written as follows:

$$P_2^t = P \left[\max_{\forall i} (-b_i^t + \eta_i^t) > -a^t + \eta^t \right] \quad (7)$$

Suppose that η_i^t , $i = 1..m$, are Gumbel random variables, identically and independently distributed with zero mean and scale parameter equal to 1. In this case also $\max_{\forall i} (-b_i^t + \eta_i^t)$ is a Gumbel random variable with scale parameter equal to 1, whose mean is $\ln \sum_{\forall i} \exp(-b_i^t)$ [6], p. 170. Denote $C_1^t = a^t$ and $C_2^t = \ln \sum_{\forall i} \exp(-b_i^t)$ as cost at time t of ICE cars and of electric cars, respectively, so that Eq. (7) is written as follows:

$$P_2^t = P \left[-C_2^t + \varepsilon_2^t > -C_1^t + \eta^t \right] \quad (8)$$

where η^t and ε_2^t are identically and independently distributed Gumbel random variables with zero mean and scale parameter equal to 1.

Eq. (8) leads to the multinomial logit model [6], so that we have:

elettrica a cui ha attribuito il numero minimo nell'insieme Θ_2 , e sceglie quest'ultima se essa risulta preferibile. Questo evento si verifica se il più piccolo fra i numeri attribuiti ai vari elementi dell'insieme Θ_2 risulta minore del numero $a^t - \eta^t$ attribuito alla propria auto, cioè $\min_{\forall i} (b_i^t - \eta_i^t) < a^t - \eta^t$, ovvero $\max_{\forall i} (-b_i^t + \eta_i^t) > -a^t + \eta^t$. Quindi la probabilità dell'evento si scrive:

$$P_2^t = P \left[\max_{\forall i} (-b_i^t + \eta_i^t) > -a^t + \eta^t \right] \quad (7)$$

Supponiamo che η_i^t , $i = 1..m$, siano variabili aleatorie di Gumbel identicamente e indipendentemente distribuite con media nulla e parametro di scala uguale a 1. In questo caso anche $\max_{\forall i} (-b_i^t + \eta_i^t)$ è una variabile di Gumbel con parametro di scala uguale a 1, la cui media è $\ln \sum_{\forall i} \exp(-b_i^t)$ [6], p. 170. Chiamiamo $C_1^t = a^t$ e $C_2^t = \ln \sum_{\forall i} \exp(-b_i^t)$ costo al tempo t delle auto MCI e delle auto elettriche, rispettivamente, per cui la (7) si scrive come segue:

$$P_2^t = P \left[-C_2^t + \varepsilon_2^t > -C_1^t + \eta^t \right] \quad (8)$$

dove η^t e ε_2^t sono variabili di Gumbel identicamente e indipendentemente distribuite a media nulla e parametro di scala uguale a 1.

La (8) conduce al modello logit multinomiale [6], per cui si ha:

$$P_2^t = \frac{1}{1 + \exp(C_2^t - C_1^t)} \quad (9)$$

Indichiamo con T_1^t e T_2^t i numeri di auto MCI ed elettriche, rispettivamente, circolanti al tempo t della sequenza Σ_2 . A causa del fatto che le difficoltà derivanti dalla insufficiente offerta di energia elettrica e dalla insufficiente dotazione di stazioni di ricarica delle batterie aumentano al crescere del numero di auto elettriche in circolazione, il numero attribuito a ciascuna auto elettrica aumenta al crescere di T_2^t . Da ciò segue che C_2^t è funzione crescente, $c_2(T_2^t)$, di T_2^t .

Poiché i possessori di auto MCI non hanno certezze circa i valori nel tempo dei costi di manutenzione e della affidabilità delle loro auto, e l'incertezza cresce col passare del tempo man mano che l'usura delle auto aumenta, mentre il numero di auto in circolazione diminuisce perché vengono progressivamente sostituite da auto elettriche, si ha che questa diminuzione è accompagnata da aumento dell'incertezza. L'incertezza genera insicurezza. Data la generale avversione al rischio, si ha che il costo attribuito alle auto MCI aumenta al crescere dell'incertezza e quindi al diminuire del numero delle auto MCI in circolazione. Da ciò segue che C_1^t è funzione decrescente, $c_1(T_1^t)$, di T_1^t .

$$P_2^t = \frac{1}{1 + \exp(C_2^t - C_1^t)} \quad (9)$$

Denote T_1^t and T_2^t as the numbers of ICE cars and of electric cars, respectively, circulating at time t of sequence Σ_2 . Since the difficulties caused by the insufficient supply of electricity and by the insufficient equipment of stations for charging batteries increase as the number of electric cars in circulation increases, the number attributed to each electric car rises as T_2^t increases. It follows that C_2^t is increasing function, $c_2(T_2^t)$, of T_2^t .

As the owners of ICE cars have not certainty about the values over time of the maintenance costs and of the reliability of their car, and uncertainty rises over time as wear of cars increases, while the number of cars in circulation decreases as they are progressively replaced with electric cars, we have that this decrease is accompanied by increase in uncertainty. Uncertainty causes insecurity. Given the general risk aversion, we have that the cost attributed to ICE cars rises as uncertainty increases, and thus as the number of cars in circulation decreases. It follows that C_1^t is decreasing function, $c_1(T_1^t)$, of T_1^t .

We denote $c_1(T_1^t)$ and $c_2(T_2^t)$ as cost functions. We attribute to $c_1(T_1^t)$ the expression of descending exponential function:

$$c_1(T_1^t) = a_1^0 \exp[a_1^1 (T_1^t - T_1^0)] \quad a_1^1 < 0 \quad (10)$$

and to $c_2(T_2^t)$ the expression of increasing second order polynomial function:

$$c_2(T_2^t) = a_2^0 + a_2^1 (T_2^t - T_2^0) + a_2^2 (T_2^t - T_2^0)^2 \quad (11)$$

where T_1^0 and T_2^0 are the values T_1^t and T_2^t at time $t = 0$ of sequence Σ_2 .

The parameters of Eq. (10) and of Eq. (11) are such that the values of C_1 and C_2 corresponding to values T_1^0 and T_2^0 are equal to values C_1 and C_2 furnished by Eq. (3) in correspondence of the $x_1^t T$ and $x_2^t T$ at the end of sequence Σ_1 , equal to values T_1^0 and T_2^0 of sequence Σ_2 .

The pattern of the (positive) derivative of the cost function of electric cars depends on the attitude to the electric car of Governments and of Public Administrations on which the supply of electricity and of charging stations depends. The more favourable this attitude is, the less the value of this derivative is, the number of electric cars in circulation being the same. The pattern of the absolute value of the (negative) derivative of the cost function of ICE cars depends on the attitude of the owners of these cars: the lower their risk aversion is the lower the absolute value of this derivative is.

As the owners of ICE cars do not know the number of cars that will circulate in the year in which they make their choice, the model assumes that they attribute the numbers to cars on the basis of the number of cars which circulated

Chiamiamo $c_1(T_1^t)$ e $c_2(T_2^t)$ funzioni di costo. Attribuiamo a $c_1(T_1^t)$ l'espressione di funzione esponenziale discendente:

$$c_1(T_1^t) = a_1^0 \exp[a_1^1(T_1^t - T_1^0)] \quad a_1^1 < 0 \quad (10)$$

ed a $c_2(T_2^t)$ l'espressione di funzione polinomiale crescente del secondo ordine.

$$c_2(T_2^t) = a_2^0 + a_2^1(T_2^t - T_2^0) + a_2^2(T_2^t - T_2^0)^2 \quad (11)$$

dove T_1^0 e T_2^0 sono i valori di T_1^t e T_2^t al tempo $t = 0$ della sequenza Σ_2 .

I parametri delle (10) e (11) sono tali che i valori di C_1 e C_2 corrispondenti ai valori T_1^0 e T_2^0 sono uguali ai valori di C_1 e C_2 forniti dalla (3) in corrispondenza degli $x_1^t T$ e $x_2^t T$ al termine della sequenza Σ_1 , uguali ai valori T_1^0 e T_2^0 della sequenza Σ_2 .

L'andamento della derivata (positiva) della funzione di costo delle auto elettriche dipende dall'atteggiamento verso l'auto elettrica dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni da cui dipende l'offerta di energia elettrica e di stazioni di ricarica: più favorevole è tale atteggiamento, minore è il valore di tale derivata a parità di numero di auto elettriche in circolazione. L'andamento del valore assoluto della derivata (negativa) delle funzione di costo delle auto MCI dipende dall'atteggiamento dei possessori di queste auto: minore è la loro avversione al rischio, minore è il valore assoluto di tale derivata.

Poiché i possessori di auto MCI non conoscono il numero di auto che circoleranno nell'anno in cui fanno la loro scelta, il modello assume che essi attribuiscono i numeri alle auto sulla base del numero di auto circolanti nell'anno precedente. Si ha quindi che i costi C_1^{t+1} e C_2^{t+1} al tempo $t + 1$ sono funzioni dei numeri T_1^t e T_2^t di auto MCI ed elettriche, rispettivamente, che hanno circolato l'anno precedente: $C_1^{t+1} = c_1(T_1^t)$ e $C_2^{t+1} = c_2(T_2^t)$.

Quindi si ha dalla (9) che la probabilità P_2^{t+1} che nell'anno $t + 1$ il possessore di un'auto MCI scelga di sostituire la propria auto con un'auto elettrica è data da:

$$P_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(T_2^t) - c_1(T_1^t)]} \quad (12)$$

Indichiamo con y_1^{t+1} la frazione del numero T_1^{t+1} di auto MCI circolanti, uguale al numero di possessori di auto MCI, che in un intervallo unitario al tempo $t + 1$ della sequenza Σ_2 viene sostituita con auto elettriche, e con \bar{y}_1^t la frazione che sarebbe sostituita se tutti coloro che ritengono un'auto elettrica migliore dell'auto MCI posseduta effettivamente sostituissero quest'ultima. Considerando P_2^{t+1} una buona stima di \bar{y}_1^t si ha:

the previous year. Thus we have that the costs C_1^{t+1} and C_2^{t+1} at time $t + 1$ are functions of the numbers T_1^t and T_2^t of ICE cars and of electric cars, respectively, which circulated the previous year: $C_1^{t+1} = c_1(T_1^t)$ and $C_2^{t+1} = c_2(T_2^t)$.

Thus we have from Eq. (9) that the probability P_2^{t+1} that in the year $t + 1$ the owner of an ICE car chooses to replace his car with an electric car is given by:

$$P_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(T_2^t) - c_1(T_1^t)]} \quad (12)$$

We denote as y_1^{t+1} the fraction of the number T_1^{t+1} of circulating ICE cars, equal to the numbers of owners of ICE cars, which in an unit interval at time $t + 1$ of sequence Σ_2 is replaced with electric cars, and as \bar{y}_1^t the fraction that would be replaced if all those who consider an electric car better than the owned car replaced the latter. Considering P_2^{t+1} a good estimate of \bar{y}_1^t , we have:

$$\bar{y}_1^t = \frac{1}{1 + \exp[c_2(T_2^t) - c_1(T_1^t)]} \quad (13)$$

We have to consider that, as in the case studied in Section 2.1., due to the uncertainty about the future of electric car, concerning for instance the infrastructural equipment for charging batteries and the reliability of the electric car, only a fraction of the ICE owners who consider the electric car preferable the ICE car, actually replace the latter. It follows that, denoted y_1^t as the fraction of T_1^t actually replaced at time t , $y_1^{t+1} - y_1^t$ is only a fraction of $\bar{y}_1^t - y_1^t$, so that we have:

$$y_1^{t+1} = y_1^t + \beta(\bar{y}_1^t - y_1^t) \quad (14)$$

where parameter β , which we suppose to be constant, is the ratio between the fraction of ICE cars that is actually replaced and that which would be replaced if all those who consider the electric car preferable to the owned ICE car would actually replace the latter. β can be considered as a measure of the confidence of the owners of ICE cars in the electric car: the greater the confidence is the higher β is. The iterated application of Eq. (14), where \bar{y}_1^t is given by Eq. (13), starting from the values y_1^0 , T_1^0 , T_2^0 at the initial time $t = 0$ of sequence Σ_2 , provides the sequence of the values y_1^t of the proportions of ICE cars which is replaced in the successive times of Σ_2 . Thus the sequence of the numbers T_1^t of the ICE cars in circulation is generated by:

$$T_1^{t+1} = T_1^t(1 - y_1^t). \quad (15)$$

starting from the value T_1^0 at the beginning of Σ_2 .

The value of the number of electric cars in circulation at time $t + 1$ is given by the sum of number T_2^0 of the electric cars circulating at the beginning of Σ_2 , plus the number $T_1^0 - T_1^t$ of electric cars deriving from the replacement of ICE cars in the interval $(0, t)$, plus the number $T^t - T^0$ of electric cars acquired anew in the same interval, where T^t and T^0 are

$$\bar{y}_1^t = \frac{1}{1 + \exp[c_2(T_2^t) - c_1(T_1^t)]} \quad (13)$$

È da considerare che, come nel caso studiato nella Sezione 2.1., a causa dell'incertezza circa il futuro dell'auto elettrica, riguardante per esempio la dotazione di infrastrutture per la ricarica delle batterie e l'affidabilità dell'auto elettrica, solo una frazione dei possessori di auto MCI che ritengono l'auto elettrica preferibile all'auto MCI posseduta, effettivamente sostituiscono quest'ultima. Da ciò segue che, detta y_1^t la frazione di T_1^t effettivamente sostituita al tempo t , $y_1^{t+1} - y_1^t$ è solo una frazione di $\bar{y}_1^t - y_1^t$, per cui si ha:

$$y_1^{t+1} = y_1^t + \beta(\bar{y}_1^t - y_1^t) \quad (14)$$

dove il parametro β , che supponiamo sia costante, è il rapporto fra la frazione di auto MCI che viene effettivamente sostituita e quella che sarebbe sostituita se tutti coloro che ritengono l'auto elettrica preferibile a quella MCI posseduta effettivamente sostituissero quest'ultima. β può essere considerato una misura della fiducia dei possessori di auto MCI nell'auto elettrica: maggiore è la fiducia più elevato è β . La iterata applicazione della (14), dove \bar{y}_1^t è dato dalla (13), partendo dai valori y_1^0, T_1^0, T_2^0 al tempo $t = 0$ iniziale della sequenza Σ_2 , fornisce la sequenza dei valori y_1^t delle proporzioni di auto MCI che viene sostituita nei successivi tempi di Σ_2 . La sequenza dei numeri T_1^t delle auto MCI in circolazione è quindi generata da:

$$T_1^{t+1} = T_1^t(1 - y_1^t). \quad (15)$$

partendo dal valore T_1^0 all'inizio di Σ_2 .

Il valore del numero di auto elettriche in circolazione al tempo $t + 1$ è dato dalla somma del numero T_2^0 di auto elettriche circolanti all'inizio di Σ_2 , più il numero $T_1^0 - T_1^t$ di auto elettriche derivanti dalla sostituzione delle auto MCI nell'intervallo $(0, t)$, più il numero $T^t - T^0$ di auto elettriche acquistate ex novo nello stesso intervallo, dove T^t e T^0 sono i numeri complessivi di auto circolanti ai tempi t e 0 della sequenza Σ_2 . Quindi la sequenza dei numeri T_2^t di auto elettriche in circolazione è generata da:

$$T_2^{t+1} = T_2^0 + T_1^0 - T_1^t + T^t - T^0 \quad (16)$$

3. Un'applicazione del modello allo studio della evoluzione del numero di auto MCI in circolazione dopo il bando alla loro vendita

In questa Sezione il modello presentato nella Sezione precedente è applicato allo studio della evoluzione nel tempo del numero di auto MCI circolanti dopo il bando alla loro vendita. Si è fatto riferimento, come caso di studio, ai sei Paesi che risultano essere i maggiori acquirenti di auto elettriche in Europa [16]: Francia, Germania, Pae-

the overall numbers of cars circulating at times t and 0 of sequence Σ_2 . Thus the sequence of the numbers T_2^t in circulation is generated by:

$$T_2^{t+1} = T_2^0 + T_1^0 - T_1^t + T^t - T^0 \quad (16)$$

3. An application of the model to the study of the evolution of the number of ICE cars in circulation after the ban on their sale

In this Section the model presented in the previous Section is applied to the study of the evolution over time of ICE cars circulating after the ban on their sale. We have referred, as a study case, to six countries which result to be the top buyers of electric cars in Europe [16]: France, Germany, Netherlands, Norway, Sweden, UK, and we have studied first the evolution over time of the number of ICE cars and of electric cars circulating in sequence Σ_v in the absence of ban on sale of ICE cars, then in sequence Σ_p in the presence of ban, so that to compare the two types of evolution.

IEA [16] registered the numbers of electric cars registered yearly, between 2005 and 2020, in these six countries, which practically coincide with numbers of electric cars circulating in these six countries. The values before 2011 are so low as to be absolutely negligible, so that we have considered only the values between 2011 and 2019. Considering these data, and the total number of cars circulating yearly in the six countries in the same time period, recorded by ACEA [1], we have computed the proportions x_2^t of electric cars circulating yearly between 2011 and 2019. These values are shown in Fig. 1.

By using the sequence relative to the period 2011-2019 of x_2^t so obtained, and the corresponding sequence of the total numbers T^t of cars circulating annually in the six countries, we have estimated, through the procedure shown in Appendix in [13], parameter β of Eq. (6) and the coefficients of cost functions $c_i(x_i^t T^t)$, $i = 1, 2$, taken to be exponential functions, as previously mentioned. In this way we have estimated that $\beta = 0.02277$, while estimation of the coefficients furnishes the following expressions of functions $c_i(x_i^t T^t)$, $i = 1$ for ICE cars, and $i = 2$ for electric cars:

$$\begin{aligned} c_1(x_1^t T^t) &= 2.22034 - 4.49007 \exp(-7.63458 x_1^t T^t) \\ c_2(x_2^t T^t) &= 1 + 5.07119 \exp(-0.57427 x_2^t T^t) \end{aligned} \quad (17)$$

where T^t is expressed in million cars.

The pattern of cost functions furnished by Eq. (17) in shown in Fig. 2. We see that at the beginning of the diffusion process, when the number of circulating electric cars is practically zero, the cost attributed to them is very high, due to the uncertainty of potential buyers, but it decreases quickly as the number of cars in circulation increases, as uncertainty decreases, and at a certain point it becomes less than the cost of ICE cars: this quick decrease is due very probably to the effectiveness of the action of opinion leaders,

si Bassi, Norvegia, Svezia, UK, e si è dapprima studiata l'evoluzione nel tempo del numero di auto MCI ed elettriche circolanti nella sequenza Σ_1 , in assenza di divieto di vendita di auto MCI, successivamente nella sequenza Σ_2 , in presenza di divieto, in modo da operare un confronto fra i due tipi di evoluzione.

IEA [16] ha registrato i numeri di auto elettriche immatricolate annualmente, fra il 2005 e il 2020 in questi sei Paesi, numeri che coincidono praticamente con quelli dei numeri di auto elettriche circolanti in questi Paesi. I valori prima del 2011 sono così bassi da essere assolutamente trascurabili, per cui abbiamo considerato solo i valori fra il 2011 e il 2020. Considerando questi dati, ed il numero totale di auto circolanti annualmente nei sei Paesi, registrato da ACEA [1], abbiamo calcolato le proporzioni x_2^t di auto elettriche circolanti annualmente tra il 2011 e il 2020. Questi valori sono riportati in Fig. 1.

Utilizzando la sequenza, relativa al periodo 2011-2020, degli x_2^t così ricavati, e la corrispondente sequenza dei numeri totali T^t di auto circolanti nei sei Paesi, sono stati stimati, mediante la procedura esposta in Appendice in [13], il parametro β della (6) ed i coefficienti delle funzioni di costo $c_i(x_i^t T^t)$, $i = 1, 2$, che abbiamo supposto essere funzioni esponenziali, come si è detto precedentemente. Abbiamo così stimato che $\beta = 0.02277$, mentre la stima dei coefficienti fornisce le seguenti espressioni per le funzioni di costo:

$$\begin{aligned} c_1(x_1^t T^t) &= 2.22034 - 4.49007 \exp(-7.63458 x_1^t T^t) \\ c_2(x_2^t T^t) &= 1 + 5.07119 \exp(-0.57427 x_2^t T^t) \end{aligned} \quad (17)$$

dove T^t è espresso in milioni di auto.

L'andamento delle funzioni di costo fornite dalla (17) è mostrato nella Fig. 2. Si vede che all'inizio del processo di diffusione, quando il numero di auto elettriche circolanti è praticamente nullo, il costo ad esse attribuito è molto elevato, a causa dell'incertezza dei potenziali compratori, ma diminuisce rapidamente all'aumentare del numero di auto in circolazione, perché l'incertezza diminuisce, e ad un certo punto diventa inferiore al costo delle auto MCI: questa rapida diminuzione è molto probabilmente dovuta alla efficacia della azione degli opinion leaders, in primo luogo i mass media [19]. Invece il costo attribuito alle auto MCI varia poco col numero di auto in circolazione: ciò è dovuto al fatto che l'incertezza circa le potenzialità delle auto MCI è molto modesta, data la loro presenza sul mercato da un tempo molto lungo.

firstly the mass media [19]. Instead the cost attributed to ICE cars changes little with the number of cars in circulation: this is due to the fact that the uncertainty about the potential of ICE cars is very low, given their presence on the market for a long time.

Assigning expression (17) to cost functions, and putting $\beta = 0.02277$ in Eq. (6), the iterated application of the latter, starting from the initial values $T^0 = 120 \cdot 10^6$ and $x_2^0 = 0.00007$ registered in 2011, furnishes the estimate of the proportions x_2^t of the electric cars that travel the roads of the six Countries in the period 2011-2020. The trajectory of x_2^t is shown in Fig. 1, superimposed on the registered points.

Then we have thought to estimate the number of ICE cars and of electric cars which will travel the roads of the six countries in the years after 2020. The first step has been to estimate the values of \bar{r} and K in Eq. (1). The estimated values, $\bar{r} = 0.13$ and $K = 150 \cdot 10^6$, are those for which Eq. (1) gives rise to a pattern over time of T^t that approaches closest to values registered in the period 2011-2020. The trajectory of T^t is shown in Fig. 3, superimposed on points obtained from experimental data.

Suppose that the diffusion process of the electric car evolves over time in such a way that β keeps the estimated value $\beta = 0.02277$ and that the costs of the ICE car and of the electric car continue to be close to the values furnished by Eq. (17), while the evolution over time of T^t is that given by Eq. (1) with $\bar{r} = 0.13$ and $K = 150 \cdot 10^6$. In this case the expressions (17) of $c_1(x_1^t T^t)$ and $c_2(x_2^t T^t)$ can be used to compute, through Eq. (5) and Eq. (6), the sequence of x_2^t and $x_1^t = 1 - x_2^t$, and then of numbers $T_1^t = x_1^t T^t$ and $T_2^t = x_2^t T^t$ of ICE cars and of electric cars circulating in the years after 2020. The trajectories T_1^t (line 1) and T_2^t (line 2) are shown

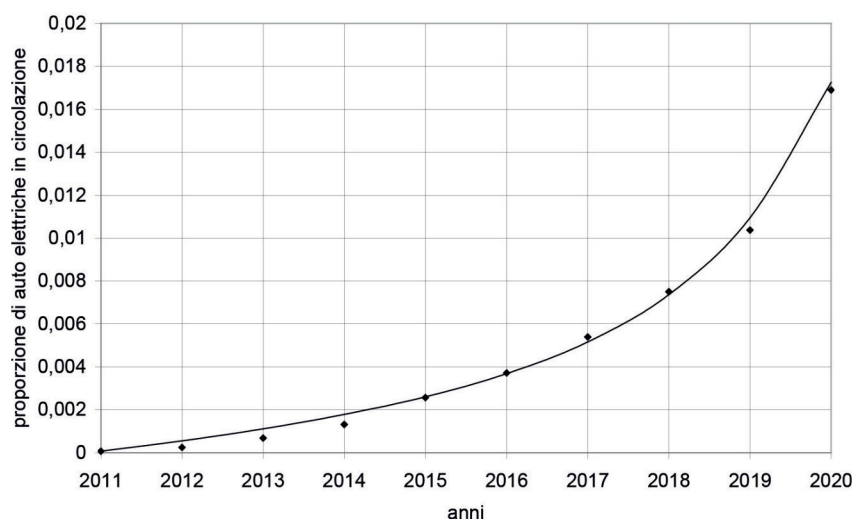


Figura 1 – Traiettorie della proporzione delle auto elettriche circolanti nei sei Paesi Europei sovrapposte ai punti registrati fra il 2011 e il 2020.

Figure 1 – Trajectory of the proportion of electric cars circulating in the six European countries superimposed on the points registered between 2011 and 2020.

Attribuendo le espressioni (17) alle funzioni di costo, e ponendo $\beta = 0.02277$ nella (6), la iterata applicazione di quest'ultima, partendo dai valori iniziali $T^0 = 120 \cdot 10^6$ e $x_2^0 = 0.00007$ registrati nel 2011, fornisce la stima delle proporzioni x_2^t delle auto elettriche che percorrono le strade dei sei Paesi nel periodo 2011-2020. La traiettoria degli x_2^t così ottenuta è riportata in Fig. 1, sovrapposta ai punti ricavati dai dati registrati.

Ci si è quindi proposto di stimare il numero di auto MCI ed elettriche che percorreranno le strade dei sei Paesi negli anni successivi al 2020. Il primo passo è stato quello di stimare i valori di \bar{r} e K nella (1). I valori stimati, $\bar{r} = 0.13$ e $K = 150 \cdot 10^6$, sono quelli per cui la (1) dà luogo ad un andamento di T^t nel tempo che si approssima maggiormente ai valori registrati nel periodo 2011-2020. La traiettoria di T^t è riportata in Fig. 3, sovrapposta ai punti corrispondenti ai dati sperimentali.

Supponiamo che il processo di diffusione dell'auto elettrica evolva nel tempo in modo che β conservi il valore stimato $\beta = 0.02277$ e che i costi dell'auto MCI e di quella elettrica continuino ad essere vicini ai valori forniti dalle (17), mentre l'evoluzione nel tempo di T^t è quella data dalla (1) con $\bar{r} = 0.13$ e $K = 150 \cdot 10^6$. In questo caso le espressioni (17) di $c_1(x_1^t T^t)$ e $c_2(x_2^t T^t)$ possono essere utilizzate per calcolare, tramite la (5) e la (6), la sequenza di x_2^t e $x_1^t = 1 - x_2^t$, e quindi dei numeri $T_1^t = x_1^t T^t$ e $T_2^t = x_2^t T^t$ di auto MCI ed elettriche circolanti negli anni successivi al 2020. Le traiettorie di T_1^t (linea 1) e T_2^t (linea 2) sono riportate nella Fig. 4. Si vede che la traiettoria relativa all'auto elettrica presenta la tipica forma ad S di evoluzione delle innovazioni [22].

A seguito del bando alla vendita delle auto elettriche queste traiettorie si interrompono nel 2035, che è l'anno iniziale della sequenza Σ_2 , alla quale si è fatto riferimento nella Sezione 2. Si è visto nella Sezione 2 che la derivata delle funzioni di costo – polinomiali crescenti del secondo ordine – delle auto elettriche è tanto minore quanto più favorevole verso l'auto elettrica è l'atteggiamento dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni, e il valore assoluto della derivata negativa delle funzioni di costo – esponenziali decrescenti – delle auto MCI è tanto più basso quanto minore è l'avversione al

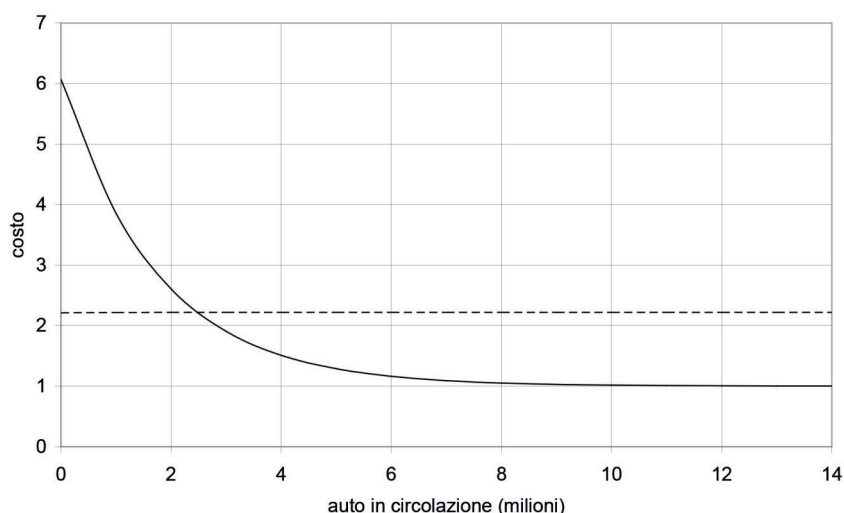


Figura 2 – Traiettorie delle funzioni di costo per le auto MCI (linea tratteggiata) e per le auto elettriche (linea continua) durante la sequenza Σ_1 .

Figure 2 – Trajectories of cost functions for ICE cars (broken line) and for electric cars (continuous line) during the sequence Σ_1 .

in Fig. 4. We see that the trajectory relative to the electric car shows the S shape of evolution of innovations [22].

Following the ban on sale of electric cars these trajectories are interrupted in 2035, which is the initial year of sequence Σ_2 , to which reference was made in Section 2. We have seen in Section 2 that the more favourable to the electric car the attitude of Governments and of Public Administration is the less the derivative of the polynomial second order increasing cost functions of electric car is, and the less

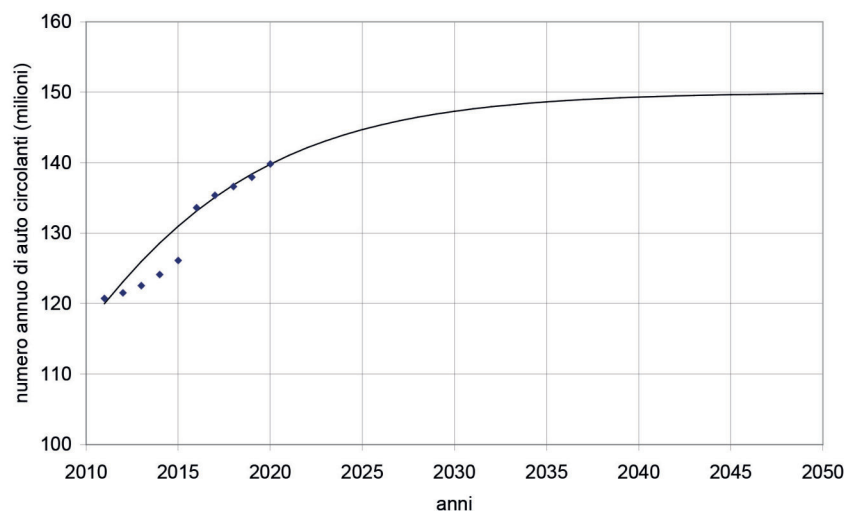


Figura 3 – Traiettoria del numero di auto circolanti annualmente nei sei Paesi Europei sovrapposta ai punti regi-strati fra il 2011 e il 2020.

Figure 3 – Trajectory of the number of cars circulating yearly in the six European countries superimposed on the points registered between 2011 and 2020.

rischio dei proprietari delle auto MCI. Allo scopo di valutare l'influenza dell'atteggiamento dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni e dei proprietari di auto MCI sulla evoluzione del numero di auto MCI circolanti nella sequenza Σ_2 , dopo il bando alla loro vendita, è stato supposto, come caso di studio, che le funzioni di costo durante la sequenza Σ_2 assumano nei vari casi due possibili espressioni per le auto MCI e per le auto elettriche rispettivamente. Le espressioni per le auto MCI sono:

$$c_1^a(T_1^t) = 2.22 \exp[0.00261(114 - T_1^t)] \quad (18)$$

$$c_1^b(T_1^t) = 2.22 \exp[0.0132(114 - T_1^t)] \quad (19)$$

dove (18) e (19) si riferiscono a bassa e alta avversione al rischio, rispettivamente, dei proprietari di auto MCI.

Le espressioni per le auto elettriche sono:

$$c_2^a(T_2^t) = 1 + 0.05(T_2^t - 34) + 0.0002(T_2^t - 34)^2 \quad (20)$$

$$c_2^b(T_2^t) = 1 + 0.12(T_2^t - 34) + 0.005(T_2^t - 34)^2 \quad (21)$$

dove (20) e (21) si riferiscono ad un atteggiamento favorevole e sfavorevole verso l'auto elettrica, rispettivamente dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni.

I parametri di tali funzioni, che sono rappresentate in Fig. 5 e Fig. 6, sono tali che i costi corrispondenti ai valori dei flussi nell'anno iniziale della sequenza Σ_2 sono uguali a quelli nell'anno finale della sequenza Σ_1 . Attribuendo le espressioni (18) e (19) alla funzione di costo (10) e le espressioni (20) e (21) alla funzione di costo (11), attraverso la iterata applicazione della (14) sono state calcolate le proporzioni y_1^t delle auto MCI circolanti che vengono sostituite da auto elettriche nei successivi tempi della sequenza Σ_2 . Poiché i valori di queste proporzioni dipendono dal valore del parametro β della (14), cioè dalla fiducia dei proprietari delle auto MCI nell'auto elettrica, sono stati considerati due valori di β , uno dei quali, $\beta = 0.02277$, molto basso, quindi rappresentativo di scarsa fiducia, è quello che è stato stimato precedentemente con riferimento al periodo 2011-2020, mentre l'altro, uguale a 0.05 è rappresentativo di una fiducia alquanto maggiore. Utilizzando questi valori di y_1^t sono state calcolate, attraverso la (15) e la (16), le traiettorie dei valori di T_1^t e di T_2^t , rappresentate in Fig. 7 e Fig. 8. La Fig. 7 è relativa al caso $\beta = 0.02277$, la Fig. 8 al caso $\beta = 0.05$.

Le traiettorie a e b , relative alle

the risk aversion of the owners of ICE cars is the lower the absolute value of the negative derivative of the decreasing cost functions of ICE cars is. In order to evaluate the influence of the attitude of Government and Public Administrations and of owners of ICE cars on the evolution of the number of ICE cars circulating in sequence Σ_2 , after the ban on their sale, we have supposed, as a study case, that the cost functions during the sequence Σ_2 assume in the various cases two possible expressions for ICE cars and for electric cars, respectively. The exponential expressions for ICE cars are:

$$c_1^a(T_1^t) = 2.22 \exp[0.00261(114 - T_1^t)] \quad (18)$$

$$c_1^b(T_1^t) = 2.22 \exp[0.0132(114 - T_1^t)] \quad (19)$$

where Eq. (18) and Eq. (19) refer to low and high risk aversion, respectively, of owners of ICE cars.

The second order polynomial expressions for electric cars are:

$$c_2^a(T_2^t) = 1 + 0.05(T_2^t - 34) + 0.0002(T_2^t - 34)^2 \quad (20)$$

$$c_2^b(T_2^t) = 1 + 0.12(T_2^t - 34) + 0.005(T_2^t - 34)^2 \quad (21)$$

where Eq. (20) and Eq. (21) refer to a favourable and unfavourable attitude, respectively, to electric cars, of Government and Public Administrations.

The parameters of these functions, which are represented in Fig. 5 and Fig. 6, are such that the costs corresponding to the flow values in the initial year of sequence Σ_2 are equal to those in final year of sequence Σ_1 . Attributing the expressions (18) and (19) to cost function (10) and the expressions (20) and (21) to cost function (11), through the it-

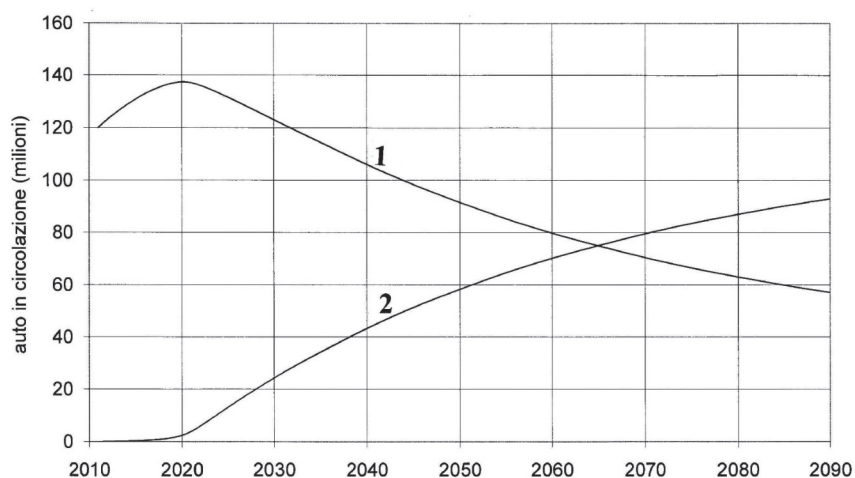


Figura 4 – Traiettorie del numero di auto MCI (linea 1) e di auto elettriche (linea 2) circolanti nei sei Paesi Europei calcolate con le funzioni di costo della Fig. 2. Figure 4 – Trajectories of the number of ICE cars (line 1) and of electric cars (line 2) circulating in the six European countries computed with cost functions of Fig. 2.

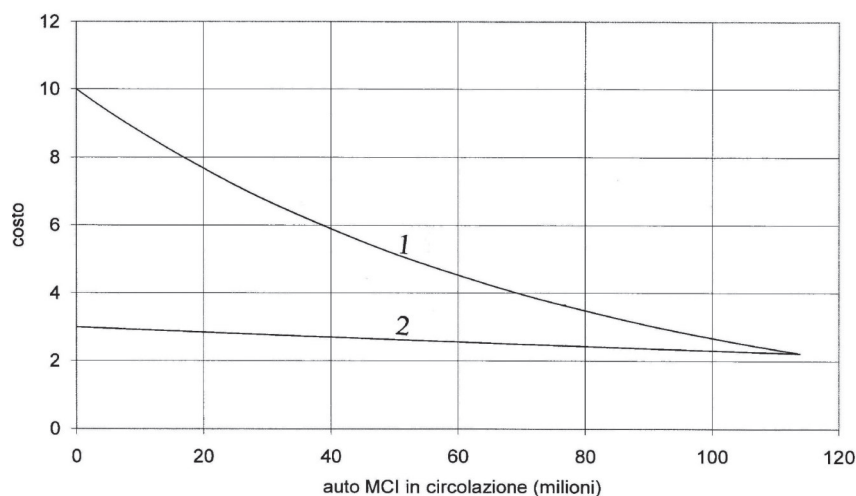


Figura 5 – Traiettorie delle funzioni di costo delle auto MCI circolanti durante la sequenza Σ_2 , nel caso (linea 1) di alta avversione al rischio e nel caso (linea 2) di bassa avversione al rischio, dei proprietari di auto MCI.

Figure 5 – Trajectories of cost functions of ICE cars circulating during sequence Σ_2 , in the case (line 1) of high risk aversion and in the case (line 2) of low risk aversion, of owners of ICE cars.

auto MCI ed elettriche, rispettivamente, in entrambe le figure sono state calcolate attribuendo le espressioni (20) e (19) alle funzioni di costo, cioè nell'ipotesi di atteggiamento favorevole all'auto elettrica dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni, e di alta avversione al rischio dei possessori di auto MCI, i quali tendono a disfarsi della propria auto, non volendo correre il rischio di frequenti e costose riparazioni: condizioni queste favorevoli al trasferimento dalle auto MCI alle auto elettriche. Le traiettorie *c* e *d*, relative alle auto MCI ed elettriche rispettivamente, sono state calcolate utilizzando le espressioni (21) e (18) delle funzioni di costo, cioè nell'ipotesi di atteggiamento sfavorevole verso l'auto elettrica dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni e di bassa avversione al rischio [7] dei possessori di auto MCI, i quali tendono a conservare a lungo la propria auto: condizioni queste sfavorevoli al trasferimento dalle auto MCI alle auto elettriche. In Fig. 7 e Fig. 8 sono anche riportate le traiettorie 1 e 2, già rappresentate in Fig. 4, dei numeri T_1' e T_2' di auto MCI ed elettriche, rispettivamente, circolanti nei sei Paesi precedentemente citati, calcolate assumendo come funzioni di costo le (17) stimate utilizzando i dati raccolti nei sei Paesi tra il 2011 e il 2020. Le traiettorie sono rappresentate con linea continua per il periodo 2011-2035, in cui non è imposto il

erated application of Eq. (14) we have computed the proportions y_1^i of circulating ICE cars which are replaced by electric cars in the successive times of sequence Σ_2 . As the values of these proportions depend on the value of parameter β of Eq. (14), i.e. on the confidence of owners of ICE cars in the electric car, we have considered two values of β , one of which, $\beta = 0.02277$, very low, thus representative of low confidence, is that which was estimated previously with reference to period 2011-2020, while the other, equal to 0.05, is representative of rather higher confidence. Using these values of y_1^i we have computed, through Eq. (15) and Eq. (16), the trajectories of values of T_1' and of T_2' represented in Fig. 7 and in Fig. 8. Fig. 7 is relative to the case in which $\beta = 0.02277$, Figure 8 to the case in which $\beta = 0.05$.

Trajectories *a* and *b*, relative to ICE cars and to electric cars, respectively, in both figures have been computed attributing expressions (20) and (19) to cost functions, i.e. in the hypothesis of favourable attitude to electric car of Governments and of Public Administrations, and of high risk aversion of owners of ICE cars, who tend to dispose of their car, not wanting to take the risk of frequent and expensive repairs: favourable conditions to shift from ICE cars to electric cars. Trajectories *c* and *d*, relative to ICE cars and to electric cars, respectively,

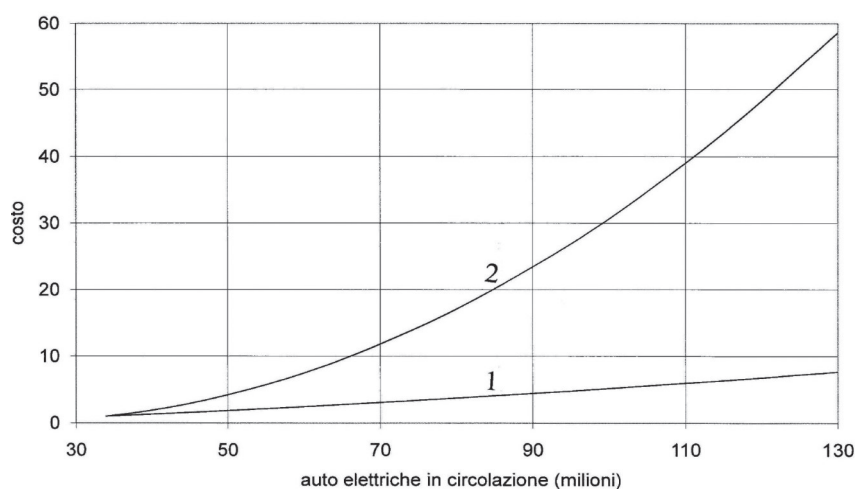


Figura 6 – Traiettorie delle funzioni di costo delle auto elettriche circolanti durante la sequenza Σ_2 , nel caso (linea 1) di atteggiamento favorevole e nel caso (linea 2) di atteggiamento sfavorevole verso l'auto elettrica, dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni.

Figure 6 – Trajectories of cost functions of electric cars circulating during the sequence Σ_2 , in the case (line 1) of favourable attitude and in the case (line 2) of unfavourable attitude to electric car, of Governments and of Public Administrations.

bando di vendite di auto MCI, e con linea tratteggiata per gli anni successivi, nei quali il bando è imposto.

Le traiettorie relative al periodo in cui è imposto il divieto si distaccano da quelle relative al periodo in cui tale divieto non è imposto nei punti corrispondenti all'anno 2035. Il confronto della parte tratteggiata di tali traiettorie con le traiettorie relative al periodo in cui il divieto è imposto pone in luce l'efficacia di tale divieto nei casi esaminati, nel determinare il trasferimento dalle auto MCI a quelle elettriche. Si osserva infatti che il numero di auto MCI in circolazione diminuisce progressivamente e in misura consistente negli anni successivi al 2035. Tuttavia l'entità di tale diminuzione dipende molto dall'atteggiamento dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni e dei proprietari di auto MCI.

Per esempio nella Fig. 7, relativa al caso in cui $\beta = 0.02277$, la traiettoria *a*, relativa a condizioni favorevoli al trasferimento da auto MCI ad auto elettriche, mostra che nell'anno 2050, 15 anni dopo l'imposizione del bando alla vendita di auto MCI, vi sono 25 milioni di auto MCI in circolazione; mentre nelle condizioni molto meno favorevoli, a cui fa riferimento la traiettoria *c*, le auto MCI in circolazione sono 50 milioni. Nell'anno 2070, nel quale nelle condizioni della traiettoria *a* le auto MCI circolanti sono scomparse, la traiettoria *c* mostra che vi sono ancora 20 milioni di auto in circolazione.

Confrontando le due figure si osserva che nel caso di basso valore di β , indicativo di scarsa fiducia nell'auto elettrica dei proprietari di auto MCI, a cui fa riferimento la Fig. 7, il numero di auto MCI circolanti è, a parità di altre condizioni, alquanto più elevato di quello che risulta nel caso di maggiore fiducia, individuata da un più elevato valore di β , a cui fa riferimento la Fig. 8.

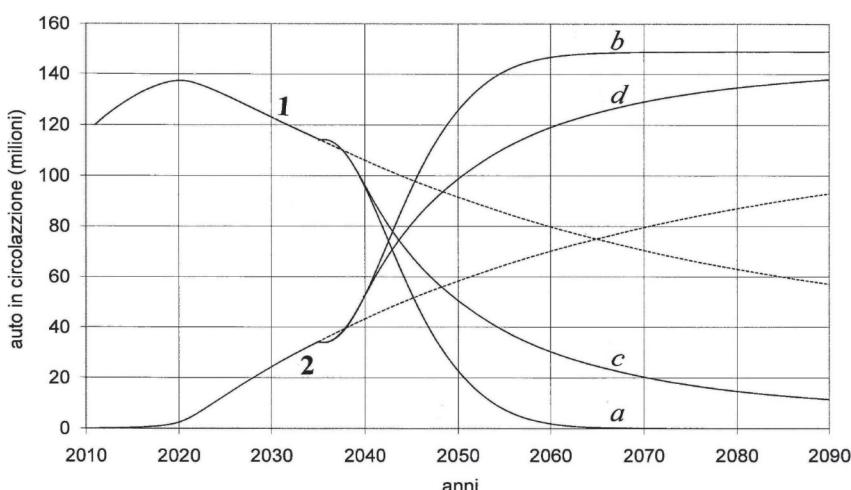


Figura 7 – Traiettorie del numero di auto MCI ed elettriche circolanti durante le sequenze Σ_1 e Σ_2 nel caso in cui $\beta = 0.02277$.

Figure 7 – Curves of the number of ICE and electric cars running during the sequences Σ_1 and Σ_2 in the case $\beta = 0.02277$.

have been computed using expressions (21) and (18) of cost functions, i.e. in the hypothesis of unfavourable attitude to electric car of Governments and Public Administrations and low risk aversion [7] of owners of ICE cars, who tend to keep for a long time their car: unfavourable conditions to shift from ICE cars to electric cars. We have also shown in Figures 7 and 8 trajectories **1** and **2**, already represented in Figure 4, of numbers T_1^i and T_2^i of ICE cars and of electric cars, respectively, circulating in the six countries previously mentioned, computed assuming as cost functions Eq. (17), estimated using the data collected in the six countries between 2011 and 2020. The trajectories are represented with continuous line for the period 2011-2035, in which the ban on sale of ICE cars is not imposed, and with broken line for the subsequent years, in which the ban is imposed.

The trajectories relative to the period in which the ban is imposed detach from those relative to the period in which is not imposed in the points corresponding to year 2035. The comparison of the broken part of these trajectories with the trajectories relative to the period in which the ban is imposed highlights the effectiveness of this ban, in the cases examined, in determining the shift from ICE cars to the electric cars. In fact we note that the number of ICE cars in circulation decreases progressively and substantially in the years after 2035. However the extent of this decrease depends largely on the attitude of Governments and Public Administrations and of the IC owners.

For instance in Figure 7, relative to the case in which $\beta = 0.02277$ trajectory *a*, relative to conditions favourable to the shift from ICE cars to electric cars, shows that in year 2050, 15 years after the imposition of the ban on sale of ICE cars, there are 25 million ICE cars in circulation; while in the much less favourable conditions to which trajectory *c* refers, the ICE cars in circulation are 50 million. In year 2070, in which in the conditions of trajectory *a* the ICE cars are missing, trajectory *c* shows that there are still 20 million cars in circulation.

Comparing the two figures we observe that in the case of low value of β , indicative of low confidence in electric car of the owners of ICE cars, to which Fig. 7 refers, the number of ICE cars in circulation is, other things being equal, somewhat higher than that which results in the case of greater confidence, identified by a greater value of β , to which Fig. 8 refers.

These figures show that the imposition of the ban on sale of ICE cars, while in the conditions in which the attitude of Governments and Public Administrations, and of owners of ICE cars, is highly favourable to electric cars can determine the quick disappearance from circulation of ICE cars, in situations in which this attitude is unfavourable can cause ICE cars to remain in circulation for long time.

Queste figure mostrano che l'imposizione del bando alla vendita di auto MCI, mentre nelle condizioni in cui l'atteggiamento sia dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni, sia dei possessori di auto MCI è fortemente favorevole all'auto elettrica può determinare la rapida scomparsa dalla circolazione delle auto MCI, in situazioni in cui tale atteggiamento è sfavorevole, può far sì che le auto MCI restino in circolazione per lungo tempo. Queste auto, fortemente inquinanti perché in circolazione da molto tempo, che in assenza del bando sarebbero state sostituite con auto MCI nuove, contribuirebbero in misura notevole all'inquinamento delle auto urbane.

4. Conclusioni

Questo articolo ha mostrato che gli effetti sulla mobilità dell'imposizione del bando alla vendita di auto MCI sono fortemente condizionati dall'atteggiamento verso l'auto elettrica dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni da un lato, e dei possessori di auto MCI dall'altro. Un atteggiamento favorevole all'auto elettrica dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni significa che viene fornita energia elettrica in misura sufficiente ad alimentare le auto elettriche in circolazione, ed un corrispondente idoneo numero di stazioni per la ricarica delle batterie. Un atteggiamento sfavorevole dei possessori di auto MCI significa che essi sono facilmente disposti a sostituire con un'auto elettrica la propria auto MCI quando questa ha raggiunto la fine della propria vita utile.

Nell'articolo si è mostrato, facendo uso di funzioni di costo ipotetiche, cioè non derivanti da dati sperimentali, ma assunte come ipotesi di un caso di studio, che l'imposizione del bando alla vendita di auto MCI determina la loro rapida scomparsa dalla circolazione se l'atteggiamento verso l'auto elettrica sia dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni, sia dei possessori di auto MCI è favorevole. In caso contrario il bando causerebbe il mantenimento in circolazione per lungo tempo di auto MCI immatricolate da molti anni, quindi fortemente inquinanti.

In conclusione il bando alla circolazione delle auto MCI determinerebbe la loro scomparsa in breve tempo, quindi un netto miglioramento delle condizioni ambientali, nel caso di atteggiamento favorevole all'auto elettrica sia dei Governi e delle Pubbliche Amministrazioni sia dei possessori di auto MCI.

In caso di atteggiamento sfavorevole il risultato del bando sarebbe il prolungamento in circolazione di vecchie auto MCI, con un peggioramento delle condizioni ambientali.

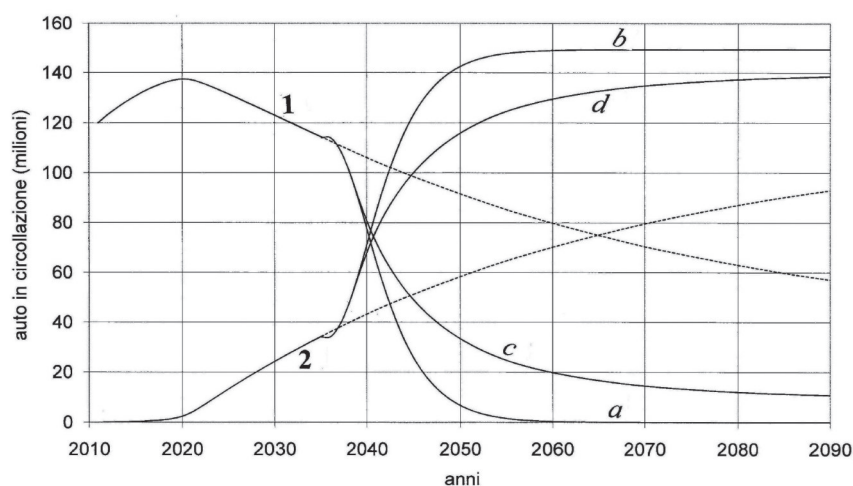


Figura 8 – Traiettorie del numero di auto MCI ed elettriche circolanti durante le sequenze Σ_1 e Σ_2 nel caso in cui $\beta = 0.05$.

Figure 8 – Curves of the number of ICE and electric cars running during the sequences Σ_1 and Σ_2 in the case $\beta = 0.05$.

These cars, which are highly polluting as they are in circulation for a long time, which in the absence of the ban would have been replaced with new ICE cars, would contribute significantly to pollution of urban areas.

4. Conclusions

This paper has shown that the effects on mobility of the imposition of the ban on sale of ICE cars are highly conditioned by the attitude to the electric car of Governments and Public Administration on one hand, and of the owners of ICE cars on the other. An attitude favourable to electric cars of Governments and Public Administrations means that enough electricity to power the electric cars in circulation, and a corresponding suitable number of battery charging stations are provided. A favourable attitude of owners of ICE cars means that they are easily willing to replace with an electric car their ICE car when the latter has reached the end of its lifetime.

The paper has shown, using hypothetical cost functions, i.e. not derived from experimental data, but assumed as an hypothesis of a study case, that the imposition of the ban on sale of ICE cars causes their quick disappearance from circulation if the attitude to electric car of both Government and public Administrations, and of owners of ICE cars is favourable. Otherwise the ban would cause the maintenance in circulation for a long time of ICE cars registered for many years, thus highly polluting.

In conclusion the ban on circulation of ICE cars would cause their disappearance in a short time, and thus a marked improvement of environmental conditions in the case of favourable attitude to electric cars of both Governments and Public Administrations, and owners of ICE cars. In case of an unfavourable attitude the result of the ban would be the continuation of circulation of old ICE cars, with deterioration of environmental conditions.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ACEA (2021a), *"Vehicles in use: European Union"*, EFTA, Europe.
- [2] ACEA (2021b), *"Diffusione delle stazioni di ricarica per auto elettriche nell'Unione Europea"*.
- [3] ANSA Motor (2021), *"Le auto elettriche percorrono più chilometri delle termiche in Europa"*.
- [4] BRAND C., ANABLE J. (2019), *"Disruption and continuity in transport energy systems: the case of the ban on new conventional fossil fuel vehicles. Europe Council for an Energy Efficient Economy Summer Study 2019"*, pp. 1117-1127.
- [5] BURCH I., GILCHRIST J. (2020), *"Survey of global activity to phase out internal combustion engine vehicles"*. The Climate Center www.theclimatecenter.org, pp. 1-17.
- [6] CASCETTA E. (1998), *"Modelli per i sistemi di trasporto. Teoria ed applicazioni"*. UTET, Torino.
- [7] CHITTY R. (2003), *"A new method of estimating risk aversion. National Bureau of Economic Research"*. Working Paper 9988.
- [8] DALLA CHIARA B. (2012), *"Considerations on the demand and use of energy in the transport systems"*, Ingegneria Ferroviaria n. 7-8, pp. 673-685.
- [9] DALLA CHIARA B. (2019), *"What evolutions and technological solutions are necessary for sustainable land transport systems"*. E3S Web of Conferences 119.
- [10] *"EU agrees to end sales of combustion engine vehicles by 2035"*. [http:// www.France4.com](http://www.France4.com).
- [11] EUROSTAT (2020), *"Energy consumption in Europe"*.
- [12] FERRARI P. (2021), *"Il processo di diffusione dell'auto elettrica"*. Ingegneria Ferroviaria n. 6, pp. 495-508.
- [13] FERRARI P. (2022), *"Oscillazioni periodiche di equilibrio nei processi di innovazione nei trasporti"*. Ingegneria Ferroviaria n. 6, pp. 647-664.
- [14] FULTON L.M., JAFFE A.M., McDONALD Z. (2019), *"Internal combustion engine bans and global oil use."* UC Davis Institute of Transportation Studies. Research Report UCD-ITS-RR-19-45.
- [15] GLAZIER S.Y., KANIOVSKI Y.M. (1991), *"Diffusion of innovations under conditions of uncertainty: A stochastic approach"*. In Diffusion of technologies and social behaviour (NAKICENOVIC N. and GRUBLER A. Eds), pp. 231-246, Springer-Verlag, Berlin.
- [16] IEA (2022). Global EV Outlook. www.iea.org.
- [17] JALONEN H. (2012), *"The uncertainty of innovation: A systematic review of the literature"*, Journal of Management Research, Vol. 4, 1, pp. 1-47.
- [18] KIMBALL M.S. (1993), *"Standard risk aversion"*. Econometrica, Vol. 61, pp. 589-611.
- [19] ORR G. (2003), *"Diffusion of innovations"*. Accademia Ed.
- [20] PRATT J.W. (1964), *"Risk aversion in the small and in the large"*. Econometrica, Vol. 32, pp. 122-136.
- [21] ROGERS E.M. (2007), *"Diffusion of innovations"*. In Knowledge and innovation management (HOFFMANN V. Ed.), Universitat Hohenheim, pp. 37-50.
- [22] VALENTE T.W. (1993), *"Diffusion of innovations and policy decision making"*. Journal of communication 43, pp. 30-45.
- [23] WANG Y., VASILAKOS A.V., MA J., XIONG N. (2014), *"On studying the impact of uncertainty on behaviour diffusion in social networks"*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Systems, Vol. 45, 2, pp. 185-197.