



## Il processo di diffusione dell'auto elettrica

### *The diffusion process of electric car*

Paolo FERRARI<sup>(\*)</sup>

**Sommario** - La ricerca sull'auto elettrica, i cui primi esemplari furono costruiti alla fine del XIX secolo, non è mai completamente cessata nel corso del secolo scorso, ed ha ricevuto un notevole impulso a partire dall'inizio degli anni '80, quando l'auto elettrica fu vista come un mezzo per mitigare l'inquinamento nelle aree urbane. Tuttavia il tasso di crescita nel tempo della proporzione delle vendite di auto elettriche rispetto al totale delle vendite di auto in Europa resta ancora molto basso. Ci si chiede pertanto se nel futuro l'auto elettrica continuerà ad avere un ruolo marginale nel mercato dell'automobile, o se invece i dati finora raccolti rappresentano il primo tratto della curva ad S tipica della diffusione delle innovazioni, e saranno quindi seguiti da un balzo nella proporzione delle vendite. Con l'obbiettivo di dare una risposta a questo quesito, questo articolo presenta un modello dinamico di competizione fra due tipi di auto, uno tradizionale e l'altro innovativo, il quale è stato applicato allo studio della evoluzione nel tempo della proporzione delle vendite di auto elettriche in Europa, utilizzando i dati raccolti fra il 2011 e il 2019. Dallo studio è risultato che questi dati appartengono ad un processo evolutivo che ha la forma ad S di diffusione delle innovazioni. Quindi, se le caratteristiche di questo processo si manterranno inalterate nel prossimo futuro, è da attendersi che i dati finora raccolti saranno seguiti da un balzo nella proporzione delle vendite e l'auto elettrica tenderà ad assumere una posizione di rilievo nel mercato dell'automobile.

### 1. Introduzione

Questo articolo studia il processo di diffusione delle auto elettriche in competizione con il processo di diffusione delle auto con motore a combustione interna (MCI), dove con auto elettriche si intende l'insieme di tutti i tipi di auto dotate di un motore elettrico per la trazione – plug-in, plug-in ibride, ibride – mentre con auto MCI si intende l'insieme di tutti i tipi di auto MCI, a benzina e diesel.

**Summary** - Research on electric cars, whose first exemplars were built at the end of the 19<sup>th</sup> century, has never completely ceased during the last century, and it received a significant boost since the early '80s, when electric car was seen as a means to mitigate the problem of air pollution in urban areas. However the growth rate over time of the proportion of sales of electric cars to the total volume of car sales in Europe still remains very low. Thus the question arises whether the electric car will continue to play a marginal role in the car market, or whether the data collected so far belong to the first stretch of the S shaped curve of the diffusion of innovations, and they will then be followed by a leap in the proportion of sales. In order to answer this question, this paper presents a dynamic model of competition between two types of cars, one traditional and the other innovative, which has been applied to the study of the evolution over time of the proportion of sales of electric cars in Europe, using the data collected between 2011 and 2019. The study has shown that these data belong to an evolution process that has the S shape of the diffusion of innovations. Thus, if the characteristics of the process will remain unchanged in the next future, it is to be expected that the data collected so far will be followed by a leap in the proportion of sales, and electric car will tend to take a remarkable position in the car market.

### 1. Introduction

This paper studies the diffusion process of electric cars in competition with the diffusion process of cars with internal combustion engine (ICE), where we mean by electric cars the set of all types of cars equipped with an electric motor for traction – plug-in, plug-in hybrid, hybrid – while we mean by ICE cars the set of all gasoline and diesel cars.

The first electric cars were built in the last decade of the 19<sup>th</sup> century, but they failed to establish themselves on the market, which was dominated by ICE cars. The reasons of the tremendous success of the latter are many, but the most important one is due to the very low energy storing capacity

<sup>(\*)</sup> Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale.

<sup>(\*)</sup> University of Pisa – Department of Civil and Industrial Engineering.

Le prime auto elettriche furono costruite nell'ultimo decennio del XIX secolo, ma non riuscirono ad imporsi sul mercato, dominato dalle auto MCI. Le ragioni dello straordinario successo di queste ultime sono diverse, ma la più importante è dovuta alla molto scarsa capacità delle batterie delle auto elettriche dell'epoca di immagazzinare energia – 18 Wh/kg nel 1901, 700 volte inferiore a quella dei combustibili liquidi delle auto MCI [4] – oltre alla enorme differenza fra il tempo di ricarica delle batterie e quello di rifornimento di un combustibile liquido. Tuttavia la produzione di auto elettriche non cessò mai del tutto, e fu rivolta a mercati di nicchia, dove le auto elettriche erano utilizzate da aziende pubbliche e private per scopi particolari, come ad esempio la consegna della posta o di generi alimentari.

La ricerca per migliorare le prestazioni delle auto elettriche è proseguita durante tutto il secolo scorso. Una importante innovazione tecnologica, nota come *regeneration breaking*, fu l'utilizzo del motore elettrico per la ricarica delle batterie durante le frenature ed i tratti percorsi in discesa. Un'altra innovazione fu quella dei veicoli ibridi, dotati di un motore elettrico e di un motore a combustione interna in serie o in parallelo [3]. I veicoli ibridi furono visti come il mezzo per combinare il meglio delle due tecnologie, silenziosi e non inquinanti nella guida in città, senza limiti di percorrenza fuori le aree urbane. Essi scomparvero dopo la prima guerra mondiale a causa del loro costo, e non furono più considerati seriamente fino al 1978 [9].

Il mercato delle auto elettriche ebbe una ripresa durante le due guerre mondiali, come conseguenza della scarsità della benzina e del fatto che i veicoli MCI venivano requisiti per contribuire allo sforzo bellico. Alla fine della guerra le aspettative erano notevoli, ma presto si disolsero, e le auto elettriche persero progressivamente terreno nei confronti delle auto MCI, a benzina e diesel [9].

L'attenzione verso le auto elettriche riprese di nuovo vigore all'inizio degli anni '80 del secolo scorso, quando furono viste come un mezzo per mitigare l'inquinamento dell'aria nelle aree urbane. Nel 1988 fu emesso dallo Stato della California il *Clean Air Act*, il quale ha dato luogo a nuove iniziative nel corso degli anni '90 per sviluppare le auto elettriche. Gli sforzi sono stati diretti principalmente verso le batterie, in particolare sulla capacità di immagazzinare energia e sulla velocità di ricarica [5] [10].

Tuttavia il tasso di crescita nel tempo della proporzione delle vendite annue di automobili elettriche in Europa resta ancora molto basso. In Europa il primo paese a promuovere l'uso dell'auto elettrica, con un robusto sostegno dello Stato, fu nel 2004 la Norvegia, seguita nel 2005 da altri paesi: nel 2019, dopo quindici anni, la proporzione delle auto elettriche, dotate delle nuove tecnologie, sul totale delle vendite di auto in Europa è stata uguale a 2.75% [10].

La diffusione delle auto elettriche oggi immesse sul mercato, come di qualunque prodotto innovativo, è do-

of electric car batteries at that time, 18 wh/kg in 1901, 700 times lower than that of liquid fuels used in ICE cars [4], in addition to the huge difference between the battery charging time and the refuel time of liquid fuels. However the production of electric cars never completely ceased, and it was aimed at niche markets, where electric cars were used for particular purposes, e.g. for mail and food delivery.

Research to improve the performance of electric cars continued during the last century. An important technological innovation, known as regeneration breaking, was the use of the electric drive motor as generator charging the batteries during breaking or when driving downhill. Another innovation was that of the hybrid vehicles, propelled by an ICE and an electric motor in series or parallel configuration [3]. Hybrids were seen as a means to combine the best of the two technologies: noiseless and non-polluting when driving in city areas, and with no limits to the trip length outside the city. However they disappeared at the end of the first World War due to their cost, and were not considered seriously again until 1978 [9].

The market of electric cars had a recovery during the two World Wars, due to gasoline shortage and requisitioning of ICE vehicles to take part in the war efforts. At the end of the wars the expectations were high, but they soon faded and electric cars lost ground to gasoline and diesel cars [9].

By the early '80s electric cars came into focus again, considered as a means to mitigate the problem of air pollution in large cities. In 1988 the State of California introduced the Clean Air Act, which gave rise to new initiatives in developing electric cars during the '90s. Efforts were focused mainly on batteries, in particular on their energy storing capacity and charging speed [5] [10].

However the growth rate over time of the proportion of sales of electric cars to the total volume of car sales in Europe still remains very low. Norway was the first European country to promote in 2004 the use of electric cars, with strong support from the State, followed in 2005 by other countries: in 2019, after fifteen years, the proportion of electric cars equipped with the new technologies to the total volume of car sales in Europe was 2.75% [10].

The diffusion of electric cars placed on the market today, like that of any innovative product, is dominated by uncertainty [8] [14] [16] whose importance in the processes of diffusion of innovations is documented by a large literature on the subject [11]. 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 causes insecurity in the evaluation of the new product by the potential buyers. 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 [13]. 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 incli-

minata dall'incertezza [8] [14] [16], la cui importanza nei processi di diffusione delle innovazioni è documentata da una vasta letteratura sull'argomento [11]. 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. Essa causa insicurezza nella valutazione del nuovo prodotto da parte dei potenziali compratori. È massima al tempo in cui il prodotto è immesso sul mercato, e diminuisce man mano che le vendite aumentano, perché contemporaneamente cresce la conoscenza delle sue potenzialità, acquisita attraverso le opinioni di coloro che l'hanno acquistato e lo utilizzano [13]. 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 [13].

Consideriamo un individuo che prende in esame la possibilità di acquistare un'auto elettrica: egli ne valuta vantaggi e svantaggi ponendoli a confronto con quelli di un'auto MCI. Nella valutazione dei vantaggi e svantaggi intervengono numerosi fattori [5], 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 veicolo; data la generale avversione al rischio, il potenziale compratore tende ad attribuire un numero tanto più elevato quanto maggiore è l'incertezza, e quindi l'insicurezza nella sua valutazione. Egli pone quindi a confronto l'auto MCI a cui ha attribuito il minimo numero nell'insieme delle auto MCI con l'auto elettrica a cui ha attribuito il minimo numero nell'insieme delle auto elettriche, e sceglie quest'ultima se risulta preferibile. Questi due numeri minimi sono le determinazioni di due variabili aleatorie, poiché la valutazione varia in maniera casuale nella popolazione dei potenziali compratori, dipendendo dalle caratteristiche psicologiche e socio-economiche di ciascuno, e anche da quelle dell'ambiente circostante. Definiamo le medie di queste due variabili aleatorie *costo* dell'auto elettrica e dell'auto MCI, rispettivamente. Per le ragioni viste sopra, il costo è tanto più alto quanto maggiore è l'incertezza dei potenziali compratori. Poiché, come si è detto prima, l'incertezza diminuisce al crescere della diffusione, il costo di ciascuna delle due tipologie di auto (MCI ed elettrica) è una funzio-

*nation or the capability to remain abreast of the most recent information about innovations, so they instead take the advice of the opinion leaders [13].*

*Consider an individual who examines the possibility to buy an electric car: he evaluates advantages and disadvantages, and compares them with those of an ICE car. There are many factors involved in evaluating advantages and disadvantages [5], 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, as will be better specified later, 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. Given the general risk aversion, the potential buyer tends to attribute a higher number the greater uncertainty, and thus insecurity, is. Then he compares the ICE car to which he assigned the minimum number in the set of ICE cars with the electric car to which he assigned the minimum number in the set of electric cars, and he chooses the latter if it is preferable. These two minimum numbers are the determinations of two random variables, as the evaluation varies randomly in the population of potential buyers, depending on the psychological and the socio-economic characteristics of each of them. We define the averages of these two random variables cost of electric cars and of ICE cars, respectively. For the reasons examined above, the greater uncertainty of potential buyers the higher cost. Since, as mentioned above, uncertainty decreases as diffusion increases, the cost of each of the two typologies of cars (ICE and electric car), is a function of its diffusion. We can think that it 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 sales increase. Instead, for the traditional ICE cars it diminishes slightly with the diffusion, as their potential is known for a long time, thus uncertainty is very low. At the beginning of the diffusion process, when the cost of an electric car is very high, in no case the latter would be preferable to an ICE car. However there are some venturesome types who are eager to experiment the potential of the new type of car, despite its possible failure: they buy it and trigger the diffusion process [13].*

*However we should consider that uncertainty that accompanies the diffusion process of electric cars is due not only to lack of knowledge of their potential, but it also concerns the future: uncertainty concerning reliability over time of the new type of vehicle, diffusion of the battery charging points, difficulties in producing an ever increasing number of batteries and in their disposal at the end of life, attitude of car manufacturers and of public administrations, which*

ne della sua diffusione: è lecito pensare che per i veicoli elettrici sia molto elevato all'inizio del processo di diffusione, perché è molto alta l'incertezza, e diminuisca più o meno rapidamente all'aumentare delle vendite. Invece per le auto MCI esso diminuisce poco al crescere della diffusione, perché le loro potenzialità sono ben note da lungo tempo, e quindi l'incertezza è molto modesta. All'inizio del processo di diffusione, quando il costo di un'auto elettrica è molto elevato, essa non sarebbe in nessun caso preferibile ad un'auto MCI. Esistono tuttavia dei tipi avventurosi, i quali sono desiderosi di sperimentare le potenzialità del nuovo tipo di auto, nonostante i possibili insuccessi: lo acquistano e così innescano il processo di diffusione [13].

Dobbiamo però tener presente che l'incertezza che accompagna il processo di diffusione dell'auto elettrica non deriva solo dalla scarsa conoscenza delle sue potenzialità, ma riguarda anche il futuro: incertezza riguardante l'affidabilità nel tempo del nuovo tipo di veicolo, la diffusione nel tempo dei punti di ricarica delle batterie, la difficoltà di produrre un numero sempre crescente di batterie e quella del loro smaltimento a fine vita, l'atteggiamento dei costruttori e delle pubbliche amministrazioni, finora molto favorevoli ai veicoli elettrici. Accade quindi che, a causa di questa incertezza circa il futuro, solo una parte di coloro che ritengono, in base alla conoscenza delle sue potenzialità, un'auto elettrica preferibile ad una MCI, effettivamente l'acquistano.

L'evoluzione nel tempo delle vendite di un prodotto innovativo di successo segue generalmente una curva ad S, la quale è costituita da un primo tratto in cui il tasso di crescita è molto modesto, seguito da una svolta improvvisa che dà luogo ad un tratto della curva in cui il tasso di crescita aumenta notevolmente nel tempo, per poi diminuire progressivamente man mano che ci si approssima all'asintoto. Quando il prodotto innovativo è immesso in un mercato dominato da un efficiente prodotto concorrente tradizionale, in un contesto economico sostanzialmente stabile, questo andamento nel tempo delle vendite è dovuto all'incertezza, da cui dipende, come si è visto, il costo attribuito al prodotto innovativo dai potenziali compratori, il quale diminuisce all'aumentare delle vendite. Quando invece non esiste un efficace prodotto tradizionale concorrente, l'andamento delle vendite segue una curva ad S se le condizioni economiche del territorio, in cui il prodotto innovativo è introdotto, evolvono nel tempo con un reddito familiare inizialmente molto basso, che ad un certo punto ha una svolta, con una forte crescita la quale consente ad un numero progressivamente crescente di famiglie di acquistare il nuovo prodotto. Un esempio di evoluzione del primo tipo è fornito da [15], il quale mostra l'andamento ad S della diffusione di un tipo di mais ibrido in due comunità dello Iowa negli USA. Esso corrisponde ad un processo di diffusione in cui inizialmente l'innovazione è adottata, a causa dell'incertezza, da un numero limitato di membri, e quindi con l'aumentare della diffusione il numero di coloro che l'adottano va aumentando fino

*have so far been very supportive of electric cars. Therefore it happens that only a fraction of those who think, on the basis of their knowledge of its potential, that an electric car is preferable to an ICE car, actually buy it.*

*The evolution over time of the sales of an innovative successful product follows in general an S shaped curve, which is constituted by a first stretch whose growth rate is very low, followed by a tipping point which gives rise to a second stretch of the curve whose growth rate significantly increases over time, and then diminishes progressively as the curve nears the asymptote. When the innovative product is placed on a market dominated by an efficient traditional competitive product, in a substantially stable economic context, this trend over time of sales is due to uncertainty, on which the cost attributed by potential buyers to the innovative product depends, which is high when the sales volume is low, and diminishes as sales increase. Instead, when there is no efficient traditional competitive product, the sales trend follows an S shaped curve if the economic conditions of the territory, where the innovative product is introduced, evolve over time with an initial very low family income, which at a certain time has a turning point, with a high increase, which allows an increasing number of families to buy the new product. An example of evolution of the first type is given by [15], which shows the S shaped curve of diffusion of a type of hybrid corn in two communities of Iowa in USA. The curve corresponds to a diffusion process in which the innovation is initially adopted by few members, because of uncertainty, and then, as the diffusion increases, more members adopt it until a saturation level is reached. An example of evolution of the second type is given by [6], which shows the trend of the yearly numbers of cars circulating in Italy in the hundred years of the diffusion of motorization, between 1900 and 2000: it is characterized by a first stretch of very low slope, in the first half of the century, when the economic conditions of families were very modest, with a tipping point around 1960, followed by a stretch of high slope in the years when the economic conditions substantially improved, allowing an increasing number of families to buy a car.*

*We can suppose that the evolution over time of the proportion of sales of electric cars follows, due to uncertainty of potential buyers, an S shaped curve. If this conjecture is founded, the values of the proportions of sales of electric cars recorded so far belong to the first stretch of this curve. Since this stretch is part of the diffusion process, it contains all the information concerning the process evolution. If we were able to extract it, by supposing that the characteristics of the process remain substantially unchanged over time, we could predict the future evolution of the diffusion of electric car, and verify if it follows the S shaped curve of the diffusion of innovations.*

*With the aim of extracting the information concerning the evolution of the process of the diffusion of electric cars from the sequence of the annual sales recorded so far, this paper presents a model of competition between an innovative car and a traditional one, which is founded on two hy-*

a raggiungere un livello di saturazione. Un esempio di evoluzione del secondo tipo è quello fornito da [6], relativo all'andamento del numero annuo di auto circolanti in Italia nei cento anni della diffusione della motorizzazione privata, fra il 1900 e il 2000: esso è caratterizzato da un primo tratto di molto lieve pendenza, nella prima metà del secolo in cui le condizioni economiche delle famiglie erano molto modeste, con un punto di svolta intorno al 1960, seguito da un tratto di forte pendenza negli anni in cui le condizioni economiche sono notevolmente migliorate, consentendo ad un numero crescente di famiglie di acquistare un'auto.

Possiamo supporre che l'evoluzione nel tempo della proporzione delle vendite di auto elettriche segua, a causa dell'incertezza dei potenziali compratori, una curva ad S. Se questa congettura è fondata, i valori delle proporzioni delle vendite di auto elettriche registrate fino ad oggi appartengono al primo tratto di questa curva, il quale, rappresentando una parte del processo di diffusione, contiene tutte le informazioni riguardanti l'evoluzione del processo. Se si riesce ad estrarre, è possibile, supponendo che le caratteristiche del processo rimangano sostanzialmente invariate nel tempo, prevedere la futura evoluzione della diffusione dell'auto elettrica, e verificare se essa segue la curva ad S di diffusione delle innovazioni.

Con l'obiettivo di estrarre le informazioni riguardanti l'evoluzione del processo di diffusione dell'auto elettrica in Europa dalla sequenza delle proporzioni delle vendite annue registrate fino ad oggi, questo articolo propone un modello dinamico di competizione tra un'auto innovativa ed una tradizionale, il quale è basato su due ipotesi ricavate dalle considerazioni fatte in precedenza: a) il costo attribuito a ciascuna delle due tipologie di auto è funzione decrescente della sua diffusione; b) la proporzione di coloro che acquistano un'auto innovativa è una frazione della proporzione di coloro che la ritengono preferibile ad una tradizionale.

Il modello, presentato nella Sezione 2 di questo articolo, è applicato nella Sezione 3 allo studio della diffusione dell'auto elettrica in Europa, utilizzando i dati sulle vendite annue di auto elettriche tra il 2011 e il 2019 raccolti dalla Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), e quelli sul totale delle vendite annue di auto nello stesso periodo raccolti dalla Associazione Europea di Costruttori di Automobili (ACEA). Infine nella Sezione 4 è presentato un breve sommario dei punti principali e sono proposte alcune conclusioni.

## 2. Un modello di competizione fra auto tradizionali e innovative

Consideriamo un territorio in cui due tipologie di auto sono offerte sul mercato: una tradizionale e l'altra innovativa. Il modello studia l'evoluzione della ripartizione delle vendite fra queste due tipologie durante una sequenza  $\Sigma$  di intervalli temporali unitari (per es. un anno), i cui numeri d'ordine individuano la sequenza dei tempi  $t$ . Sia  $T^t$  il nu-

*potheses derived from the considerations made above: a) the cost attributed to each of the two typologies of cars is a decreasing function of its diffusion; b) the proportion of those who buy an innovative car is only a fraction of those who consider it preferable to a traditional one.*

*The model, presented in Section 2 of this paper, is applied in Section 3 to the study of the diffusion of electric car in Europe, using the data of annual sales of electric cars from 2011 to 2019 recorded by the International Energy Agency (IEA), and those of the total volume of car sales in Europe in the same period recorded by the European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). Lastly, a brief summary of the main points is presented and some conclusions are put forward in Section 4.*

### 2. A model of competition between traditional and innovative cars

*Consider a territory where two typologies of cars are offered on the market: one traditional and the other innovative. The model studies the evolution of the sales split between these two typologies of cars during a sequence  $\Sigma$  of unit time intervals (e.g. one year), whose order numbers identify the sequence of times  $t$ . Let  $T^t$  be the number of cars sold in one time unit at time  $t$ : labelling with **1** the traditional cars and with **2** the innovative ones, let  $x_1^t$  and  $x_2^t$  be the proportions of  $T^t$  composed by traditional and innovative cars, respectively, at time  $t$ , so that the corresponding numbers of sales are  $x_1^t T^t$  and  $x_2^t T^t$ .*

*Let  $\Theta_1$  and  $\Theta_2$  be the sets of the types and models of traditional and innovative cars that are offered on the market, and let  $m$  and  $n$  be the numbers of the elements of  $\Theta_1$  and  $\Theta_2$ , respectively. As mentioned in Section 1, we suppose that an individual, who intends to purchase a car, assigns to each element of the two sets a number, which depends on his evaluations of advantages and disadvantages of each type and model of car: the less favourable the evaluations are and, for the reasons mentioned in Section 1, the greater uncertainty in evaluations is, the higher the number is. Since these evaluations are dispersed in the population of potential buyers, the number assigned to each element of the sets is a random variable. Let,  $a_i^t - \eta_i^t$ ,  $i = 1, \dots, m$ , and  $b_j^t - \eta_j^t$ ,  $j = 1, \dots, n$ , be the numbers assigned by the potential buyers to the elements of  $\Theta_1$  and  $\Theta_2$ , respectively, at time  $t$ , where  $a_i^t$  is the average of the numbers assigned to the type and model  $i$  of traditional car,  $b_j^t$  is the average of the numbers assigned to the type and model  $j$  of innovative car, while  $\eta_i^t$  and  $\eta_j^t$  are random variables identically and independently distributed with zero mean.*

*To make his choice, a potential buyer compares the type and model of traditional car to which he assigns the minimum number in set  $\Theta_1$  with the type and model of innovative car to which he assigns the minimum number in set  $\Theta_2$ , and he chooses the innovative car if it results preferable. Thus the probability  $P_2^t$  that this event occurs at time  $t$  is written as follows:*

mero di auto vendute al tempo  $t$ : etichettando con 1 le auto tradizionali e con 2 quelle innovative, siano  $x_i^t$  e  $x_2^t$  le proporzioni di  $T^t$  al tempo  $t$  composte rispettivamente da auto tradizionali e innovative, per cui i corrispondenti numeri di vendite sono  $x_i^t T^t$  e  $x_2^t T^t$ .

Siano  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$  gli insiemi dei tipi e modelli di automobili tradizionali e innovative offerti sul mercato e siano  $m$  e  $n$  i numeri degli elementi rispettivamente di  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$ . Come abbiamo visto nella Sezione 1, una persona che intende comperare un'automobile attribuisce a ciascun elemento dei due insiemi un numero, che dipende dalle sue valutazioni su vantaggi e svantaggi di ciascun tipo e modello di veicolo: meno favorevoli sono le valutazioni e, per le ragioni viste nella Sezione 1, quanto maggiore è l'incertezza nella valutazione, più alto è il numero. Poiché queste valutazioni sono disperse nella popolazione dei potenziali compratori, dipendendo dalle loro caratteristiche psicologiche e socio-economiche e anche da quelle dell'ambiente circostante, il numero assegnato a ciascun elemento degli insiemi è la determinazione di una variabile aleatoria. Siano  $a_i^t - \eta_i^t$ ,  $i = 1, \dots, m$ , e  $b_j^t - \eta_j^t$ ,  $j = 1, \dots, n$ , i numeri attribuiti al tempo  $t$  dai potenziali compratori agli elementi di  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$  rispettivamente, dove  $a_i^t$  è la media dei numeri attribuiti al tipo e modello  $i$  di auto tradizionale,  $b_j^t$  la media dei numeri attribuiti al tipo e modello  $j$  di auto innovativa, mentre  $\eta_i^t$  e  $\eta_j^t$  sono variabili aleatorie identicamente e indipendentemente distribuite con media nulla.

Per fare la sua scelta un potenziale compratore pone a confronto il tipo e modello di auto tradizionale al quale attribuisce il minimo numero nell'insieme  $\Theta_1$  con il tipo e modello di auto innovativa al quale attribuisce il minimo numero nell'insieme  $\Theta_2$ , e sceglie l'auto innovativa se essa risulta preferibile. Quindi la probabilità che questo evento si verifichi si scrive nel modo seguente:

$$P_2^t = P \left[ \begin{array}{c} \max(-a_i^t + \eta_i^t) > \max(-b_j^t + \eta_j^t) \\ \forall i \\ \forall j \end{array} \right] \quad (1)$$

Supponendo che  $\eta_i^t$  e  $\eta_j^t$  siano variabili aleatorie di Gumbel identicamente e indipendentemente distribuite con media nulla e parametro di scala uguale a 1, anche  $\max(-a_i^t + \eta_i^t)$  e  $\max(-b_j^t + \eta_j^t)$  sono variabili aleatorie di  $\forall i$  e  $\forall j$  Gumbel con parametro di scala uguale a 1, le cui medie sono  $\ln \sum_i \exp(-a_i^t)$  e  $\ln \sum_j \exp(-b_j^t)$  rispettivamente. Chiamiamo  $C_1^t = -\ln \sum_i \exp(-a_i^t)$  e  $C_2^t = -\ln \sum_j \exp(-b_j^t)$  costo al tempo  $t$  delle auto tradizionali e delle auto innovative rispettivamente, per cui la (1) si scrive come segue:

$$P_2^t = P \left[ -C_2^t + \varepsilon_2^t > -C_1^t + \varepsilon_1^t \right] \quad (2)$$

dove  $\varepsilon_1^t$  e  $\varepsilon_2^t$  sono variabili di Gumbel identicamente e indipendentemente distribuite a media nulla e parametro di scala uguale a 1.

$$P_2^t = P \left[ \begin{array}{c} \max(-a_i^t + \eta_i^t) > \max(-b_j^t + \eta_j^t) \\ \forall i \\ \forall j \end{array} \right] \quad (1)$$

Suppose that  $\eta_i^t$  and  $\eta_j^t$  are Gumbel random variables identically and independently distributed with zero mean and scale parameter equal to 1. In this case also

$\max(-a_i^t + \eta_i^t)$  and  $\max(-b_j^t + \eta_j^t)$  are Gumbel random

variables whose means are  $\ln \sum_i \exp(-a_i^t)$  and

$\ln \sum_j \exp(-b_j^t)$ . We name  $C_1^t = -\ln \sum_i \exp(-a_i^t)$  and  $C_2^t = -\ln \sum_j \exp(-b_j^t)$  cost of traditional cars and in-

novative cars respectively, so that Eq. (1) can be written as follows:

$$P_2^t = P \left[ -C_2^t + \varepsilon_2^t > -C_1^t + \varepsilon_1^t \right] \quad (2)$$

where  $\varepsilon_1^t$  and  $\varepsilon_2^t$  are Gumbel random variables identically and independently distributed with zero mean and parameter scale equal to 1.

Eq. (2) leads to the multinomial logit model [2], so that we have:

$$P_2^t = \frac{1}{1 + \exp(C_2^t - C_1^t)} \quad (3)$$

As seen previously, the number attributed by a potential buyer to each element of sets  $\Theta_1$  and  $\Theta_2$  is higher the greater uncertainty is, and on the other hand uncertainty relative to each typology of car diminishes as its diffusion – i.e. the number of cars sold in the successive times of sequence  $\Sigma$  – increases. Since potential buyers do not know the number of cars that will be sold in the year when they make their choice, the model assumes that uncertainty – that accompanies their evaluations about each typology of car – is a decreasing function of the corresponding number of cars sold in the previous year. From this it follows that costs  $C_1^{t+1}$  and  $C_2^{t+1}$  at time  $t+1$  are decreasing functions, of the numbers  $x_i^t T^t$  and  $x_2^t T^t$  of traditional and innovative cars, respectively, sold 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 and, since cost diminishes as diffusion increases, we assign to them the expression of a descending exponential function:

$$c_i(x_i^t T^t) = a_{i,0} + a_{i,1} \exp(a_{i,2} x_i^t T^t) \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

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

Thus we have from Eq (3) that probability  $P_2^{t+1}$  that an innovative car is chosen at time  $t+1$  is written as follows:

$$P_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp \left[ c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t) \right]} \quad (5)$$

La (2) conduce al modello logit multinomiale [2], per cui si ha:

$$P_2^t = \frac{1}{1 + \exp(C_2^t - C_1^t)} \quad (3)$$

Come si è visto precedentemente, il numero attribuito da un potenziale compratore a ciascun elemento degli insiemi  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$  è tanto più elevato quanto maggiore è l'incertezza, e d'altra parte l'incertezza relativa a ciascuna tipologia di auto diminuisce al crescere della sua diffusione, cioè del numero di auto vendute nei successivi tempi della sequenza  $\Sigma$ . Poiché i potenziali compratori non conoscono il numero di auto che saranno vendute 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 vendute nell'anno precedente. Da ciò segue che i costi  $C_i^{t+1}$  e  $C_2^t$  al tempo  $t+1$  sono funzioni decrescenti dei numeri  $x_i^t T^t$  e  $x_2^t T^t$  di auto tradizionali e innovative, rispettivamente, vendute al tempo  $t$ :  $C_i^{t+1} = c_i(x_i^t T^t)$ ,  $C_2^t = c_2(x_2^t T^t)$ . Chiamiamo  $c_1(x_i^t T^t)$  e  $c_2(x_2^t T^t)$  funzioni di costo, e attribuiamo ad esse l'espressione di funzione esponenziale discendente:

$$c_i(x_i^t T^t) = a_{i,0} + a_{i,1} \exp(a_{i,2} x_i^t T^t) \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

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

Quindi si ha dalla (3) che la probabilità  $P_2^{t+1}$  che un'auto innovativa venga scelta al tempo  $t+1$  si scrive come segue:

$$P_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (5)$$

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

Indichiamo con  $\bar{x}_2^{t+1}$  la frazione di  $T^{t+1}$  che sarebbe composta di auto innovative se tutti i potenziali compratori, che hanno scelto un'auto innovativa, effettivamente la comprassero. Considerando  $P_2^{t+1}$  una buona stima di  $\bar{x}_2^{t+1}$ , si ha dalla (5):

$$\bar{x}_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (6)$$

Come si è visto nella Sezione 1, a causa dell'incertezza circa il futuro, solo una frazione di coloro che scelgono un'auto innovativa effettivamente la acquistano. Ciò significa che l'incremento  $x_2^{t+1} - x_2^t$  della proporzione di auto innovative vendute fra un anno  $t$  e il successivo  $t+1$  è una frazione dell'incremento  $\bar{x}_2^{t+1} - x_2^t$  che si sarebbe verificato se tutti coloro che hanno scelto un'auto innovativa effettivamente l'avessero comprata. Per cui si ha:

$$x_2^{t+1} = x_2^t + \beta (\bar{x}_2^{t+1} - x_2^t) \quad (7)$$

dove il parametro  $\beta$ ,  $0 < \beta < 1$ , che supponiamo sia costante, può essere considerato una misura dell'incertezza circa il futuro dell'auto innovativa, la quale è tanto maggiore quanto più basso è  $\beta$ .

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

We denote  $\bar{x}_2^{t+1}$  as the fraction of  $T^{t+1}$  which would be composed of innovative cars if all potential buyers, who chose an innovative car, actually bought it. By considering  $P_2^{t+1}$  a good estimate of  $\bar{x}_2^{t+1}$ , we have from Eq. (5):

$$\bar{x}_2^{t+1} = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(x_1^t T^t)]} \quad (6)$$

As mentioned in Section 1, because of uncertainty, only a fraction of those who chose an innovative car actually purchase it. This means that the increase  $x_2^{t+1} - x_2^t$  in the proportion of cars sold between year  $t$  and the next  $t+1$  is a fraction of the increase  $\bar{x}_2^{t+1} - x_2^t$  that would have occurred if all those who chose an innovative car, had bought it. So we have:

$$x_2^{t+1} = x_2^t + \beta (\bar{x}_2^{t+1} - x_2^t) \quad (7)$$

where parameter  $\beta$ ,  $0 < \beta < 1$ , which we suppose to be constant, can be considered a measure of uncertainty about the future of the innovative car: the less  $\beta$  is, the higher uncertainty is.

The iterate application of Eq (7), starting with the initial values  $x_2^0$  and  $T^0$  of  $x_2^t$  and  $T^t$ , respectively, furnishes the time sequence of the proportions of sales of the innovative car, i.e. its diffusion process. The application of Eq (7) requires the knowledge of its parameters, i.e. the values of  $\beta$  and of the coefficients of cost functions. We suppose that the sequence of  $T^t$  and that of the proportions  $\hat{x}_2^t$  of the yearly sales of innovative cars are known, surveyed in a sequence  $\Sigma$  of times  $t$ , at interval of one year. We aim to use these sequences to estimate the value of parameter  $\beta$  and the coefficients of the two cost functions  $c_i(x_i^t T^t)$ ,  $i = 1, 2$ , in such a way that the values  $x_2^t$  given by the iterated application of Eq. (7) are as close as possible to  $\hat{x}_2^t$ .

We denote by  $\mathbf{a}_i = (a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2})^T$ ,  $i = 1, 2$ , the vectors of the coefficients of cost functions  $c_i(x_i^t T^t)$ ,  $i = 1, 2$ . Having assigned the value of parameter  $\beta$  and vectors  $\mathbf{a}_p$  iterate application of Eq. (7), where  $\bar{x}_2^{t+1}$  is given by Eq (6), starting with the initial values  $T^0$  and  $x_2^0$ , computes the sequence  $\{x_2^t | \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta\}$  of  $x_2^t$  in the successive times of  $\Sigma$ . The values of  $\beta$  and the vectors  $\mathbf{a}_1$  and  $\mathbf{a}_2$  that minimize the sum of the square deviations  $[\hat{x}_2^t - (x_2^t | \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)]^2$  for all times of sequence  $\Sigma$  are assumed as estimates of  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ ,  $\beta$ .

Thus the estimates are obtained by solving the following problem:

$$\min_{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta} \Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta) \quad (8)$$

where:

$$\Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta) = \sum_{\forall t \in \Sigma} [\hat{x}_2^t - (x_2^t | \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)]^2 \quad (9)$$

We cannot define the analytic expression for  $\Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)$ , and thus the solution of problem (8) is obtained through a sequence of steps in each of which a set of  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ ,  $\beta$  is chosen

La iterata applicazione della (7), a partire dal valore iniziale  $x_2^0$  di  $x_2^t$ , e  $T^0$  di  $T^t$ , fornisce la sequenza temporale delle proporzioni delle vendite dell'auto innovativa, cioè il suo processo di diffusione. L'applicazione della (7) richiede la conoscenza dei suoi parametri, cioè dei valori di  $\beta$  e dei coefficienti delle funzioni di costo. Supponiamo che la sequenza delle vendite annue  $T^t$  di auto e quella delle proporzioni  $\hat{x}_2^t$  di auto innovative vendute ogni anno siano note, registrate in una sequenza  $\Sigma$  di tempi  $t$ , a distanza di un anno. Ci proponiamo di usare queste sequenze per stimare il valore del parametro  $\beta$  e quelli dei coefficienti delle funzioni di costo  $c_i(x_i^t T^t)$ ,  $i = 1, 2$ , in modo tale che i valori  $x_2^t$  ottenuti mediante la iterata applicazione della (7) siano il più possibile vicini a quelli registrati  $\hat{x}_2^t$ .

Indichiamo con  $\mathbf{a}_i = (a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2})^T$ ,  $i = 1, 2$ , i vettori dei coefficienti delle funzioni di costo  $c_i(x_i^t T^t)$ ,  $i = 1, 2$ . Avendo assegnato il valore del parametro  $\beta$  e i vettori  $\mathbf{a}_i$ , l'iterata applicazione della (7), dove  $\bar{x}_2^{t+1}$  è dato dalla (6), partendo dai valori iniziali  $T^0$  e  $x_2^0 = \hat{x}_2^0$  fornisce le sequenze  $[x_2^t | \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta]$  di  $x_2^t$  nei successivi tempi di  $\Sigma$ . I valori di  $\beta$  e dei vettori  $\mathbf{a}_1$  e  $\mathbf{a}_2$  che minimizzano la somma degli scarti quadratici  $[\hat{x}_2^t - (x_2^t | \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)]^2$  per tutti i tempi della sequenza  $\Sigma$  sono assunti come stime di  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  e  $\beta$ .

Quindi le stime sono ottenute risolvendo il seguente problema:

$$\min_{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta} \Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta) \quad (8)$$

dove:

$$\Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta) = \sum_{t \in \Sigma} [\hat{x}_2^t - (x_2^t | \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)]^2 \quad (9)$$

Non riusciamo a definire l'espressione analitica di  $\Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)$ , per cui la soluzione del problema (8) è ottenuta attraverso una sequenza di passi in ciascuno dei quali si sceglie un insieme di  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ ,  $\beta$  e si calcola il corrispondente valore di  $\Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)$ . La procedura è ripetuta finché un criterio di arresto è soddisfatto. Fra i vari algoritmi che possono essere utilizzati, nell'applicazione presentata nella Sezione successiva è stato scelto il metodo del simplex discendente proposto da NELDER e MEAD [12]. Una presentazione della versione del metodo di NELDER e MEAD adatta alla soluzione del problema (8) è in [7].

### 3. Una applicazione del modello allo studio del processo di diffusione dell'auto elettrica in Europa

In questa Sezione il modello presentato nella Sezione precedente è applicato allo studio della evoluzione nel tempo della ripartizione delle vendite di auto in Europa fra auto MCI e auto elettriche, considerate rispettivamente tradizionali e innovative, etichettate quindi con gli indici  $i = 1$  e  $i = 2$  rispettivamente, utilizzando i dati forniti da IEA [10] e ACEA [1].

IEA ha registrato il numero di auto elettriche immatri-

and the corresponding value of  $\Phi(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \beta)$  is computed. The procedure is repeated until a stop criterion is satisfied. Among the various algorithms that could be used, in the applications presented in the following Section we have chosen the downhill simplex method proposed by NELDER and MEAD [12]. A presentation of a version of the method of NELDER and MEAD, suitable for the solution of problem (8), is in [7].

### 3. An application of the model to the study of the diffusion process of electric car in Europe

In this Section the model presented in the previous Section is applied to the study of the evolution over time of the split of car sales in Europe between ICE cars and electric cars, which are considered traditional and innovative, respectively, and thus are labelled with indexes 1 and 2 respectively, by utilizing the data provided by IEA [10] and by ACEA [1].

IEA has recorded the number of electric cars registered yearly, between 2005 and 2019, in the European countries where electric cars are present on the market. The values before 2011 are so low as to be absolutely negligible, so that we have considered only the values between 2011 and 2019. Knowing these data, and the total number of cars registered yearly in Europe in the same time period, recorded by ACEA, we have computed the proportions  $x_2^t$  of electric cars sold yearly in Europe between 2011 and 2019. These values are shown in Fig. 1.

By using the sequence relative to the period between 2011 and 2019 of  $x_2^t$  derived from the recorded data, and the corresponding sequence of the total numbers  $T^t$  of cars registered annually in Europe, we have estimated, through the procedure shown in section 2, parameter  $\beta$  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  $\beta = 0.232$ , 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:

$$\begin{aligned} c_1(x_1^t T^t) &= 1.499 + 1.332 \exp(-0.0856 x_1^t T^t) \\ c_2(x_2^t T^t) &= 1.000 + 5.578 \exp(-1.2098 x_2^t T^t) \end{aligned} \quad (10)$$

where  $T^t$  is expressed in million cars.

By assigning expressions (10) to cost functions in Eq. (4), and putting  $\beta = 0.232$  in Eq. (7), the iterated application of the latter, starting with the initial values  $T^0 = 12.809 \cdot 10^6$  and  $x_2^0 = 0.000632$  recorded in 2011, furnishes the estimation of the proportions of the yearly sales of electric cars between 2011 and 2019. The trajectory of the resulting  $x_2^t$  is shown in Fig. 1, superimposed on the points corresponding to the values derived from the recorded data.

At this point we have addressed the problem of estimating the evolution of the diffusion of the electric cars after 2019. The first step has been the estimation of the pattern of the total yearly car sale  $T^t$  in Europe after 2019. We have supposed that the evolution over time of  $T^t$ , starting with the

colate annualmente, fra il 2005 e il 2019, nei paesi europei in cui le auto elettriche sono presenti sul mercato. I valori prima del 2011 sono così bassi da essere assolutamente trascurabili, per cui abbiamo considerato solo i valori fra il 2011 e il 2019. Conoscendo questi dati, ed il numero totale di auto immatricolate annualmente in Europa nello stesso periodo di tempo, registrate da ACEA, abbiamo calcolato le proporzioni  $x_i^t$  di auto elettriche vendute annualmente in Europa tra il 2011 e il 2019. Questi valori sono riportati in Fig. 1.

Utilizzando la sequenza, relativa al periodo 2011-2019, degli  $x_i^t$  così ricavati dai dati registrati, e la corrispondente sequenza dei numeri totali  $T^t$  di auto immatricolate annualmente in Europa, abbiamo stimato, mediante la procedura illustrata nella precedente Sezione, il parametro  $\beta$  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  $\beta = 0.232$ , mentre la stima dei coefficienti fornisce le seguenti espressioni per le funzioni  $c_i(x_i^t T^t)$ , rispettivamente per l'auto MCI,  $i = 1$ , e per l'auto elettrica,  $i = 2$ :

$$\begin{aligned} c_1(x_1^t T^t) &= 1.499 + 1.332 \exp(-0.0856 x_1^t T^t) \\ c_2(x_2^t T^t) &= 1.000 + 5.578 \exp(-1.2098 x_2^t T^t) \end{aligned} \quad (10)$$

dove  $T^t$  è espresso in milioni di auto.

Attribuendo le espressioni (10) alle funzioni di costo (4), e ponendo  $\beta = 0.232$  nella (7), la iterata applicazione di quest'ultima, partendo dai valori iniziali  $T^0 = 12.809 \cdot 10^6$  e  $x_2^0 = 0.000632$  registrati nel 2011, fornisce la stima delle proporzioni di vendite annue di auto elettriche fra il 2011 e il 2019. La traiettoria degli  $x_i^t$  così ottenuta è riportata nella Fig. 1, sovrapposta ai punti corrispondenti ai valori ricavati dai dati registrati.

Ci si è quindi proposto di stimare l'evoluzione del processo di diffusione dell'auto elettrica dopo il 2019. Il primo passo è stato quello di stimare l'andamento delle vendite totali di auto  $T^t$  in Europa oltre il 2019. Si è supposto che l'evoluzione nel tempo di  $T^t$ , a partire dal valore iniziale  $T^0 = 12.809 \cdot 10^6$  registrato nel 2011, sia data dalla equazione:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + r \left( 1 - \frac{T^t}{K} \right) \right] \quad (11)$$

I valori stimati dei parametri  $r$  e  $K$  sono quelli per cui la (11) dà luogo ad un andamento di  $T^t$  nel tempo che si sovrappone ai punti corrispondenti ai valori registrati nel periodo 2016-2019, trascurando i valori precedenti il 2016 perché, essendo fortemente influenzati dalla crisi economica successiva al 2009, introdurrebbero gravi errori nella stima di lungo periodo di  $T^t$ . Si sono così stimati  $r = 0.2$  e

initial value  $T^0 = 12.809 \cdot 10^6$  recorded in 2011, is given by the following equation:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + r \left( 1 - \frac{T^t}{K} \right) \right] \quad (11)$$

The estimated values of parameter  $r$  and  $K$  are those for which Eq. (11) gives rise to a trajectory of  $T^t$  over time that is superimposed on the points corresponding to the values recorded in the period 2016-2019, neglecting the values prior to 2016, as they would introduce serious errors in the long-term estimate of  $T^t$ , being strongly influenced by the economic crisis after 2009. So we have estimated  $r = 0.2$  and  $K = 16.5 \cdot 10^6$ . The trajectory of  $T^t$  is shown in Fig. 2, superimposed on the points corresponding to the experimental values.

Suppose that the process of diffusion of electric car in Europe evolves over time in such a way that  $\beta$  maintains the estimated value  $\beta = 0.232$ , and that the costs of electric car and of ICE car continue to be close to the values furnished by Eq. (10), while the evolution over time of  $T^t$  is that given by Eq. (11) with  $r = 0.2$  and  $K = 16.5 \cdot 10^6$ . In this case the expressions (10) of  $c_i(x_i^t T^t)$  can be used to compute, through Eq. (6) and Eq. (7), the sequence of  $x_i^t$  in the years after 2019. The trajectory of this sequence is shown in Fig. 3, superimposed on the points corresponding to the values recorded up to 2019.

This trajectory has the S shape of the curve of diffusion of innovations, whose initial stretch with low slope is constituted by the  $x_i^t$  recorded between 2011 and 2019: it shows a tipping point between 2021 and 2022, beyond which the slope increases remarkably for a certain time period, and then it diminishes progressively tending towards the asymptote. The figure shows that in the coming years there should be a sharp increase in the proportion of sales of electric cars,

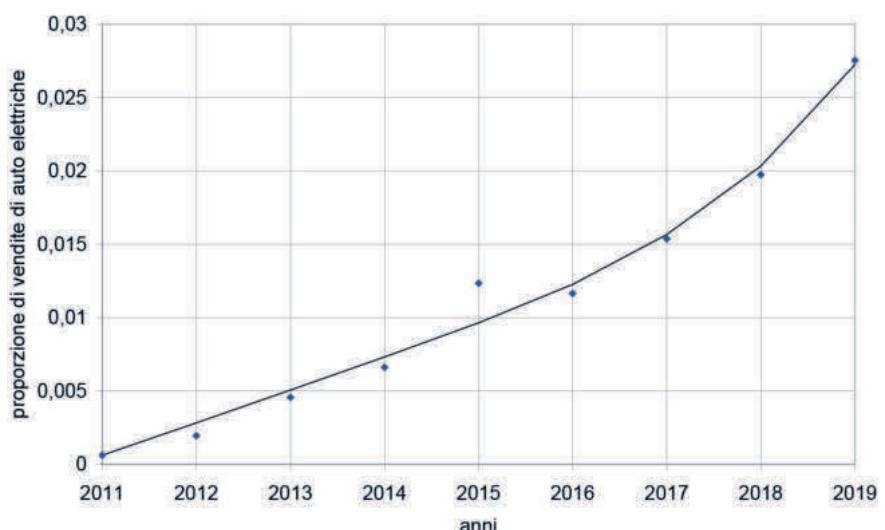


Figura 1 – Traiettoria della proporzione di vendite di auto elettriche in Europa sovrapposta ai punti registrati fra il 2011 e il 2019.

Figure 1 – Trajectory of the proportion of sales of electric cars in Europe superimposed on the points recorded between 2011 and 2019.

$K = 16.5 \cdot 10^6$ . La traiettoria di  $T^t$  è riportata nella Fig. 2, sovrapposta ai punti corrispondenti ai valori sperimentali.

Supponiamo che il processo di diffusione dell'auto elettrica in Europa evolva nel tempo in modo tale che  $\beta$  conservi il valore stimato  $\beta = 0.232$ , e che i costi dell'auto elettrica e dell'auto MCI continuino ad essere vicini ai valori forniti dalle (10), mentre l'evoluzione nel tempo di  $T^t$  è quella data dalla (11) con  $r = 0.2$  e  $K = 16.5 \cdot 10^6$ . In questo caso le espressioni (10) di  $c_i(x_i^t T^t)$  possono essere utilizzate per calcolare, tramite la (6) e la (7), la sequenza di  $x_2^t$  negli anni successivi al 2019. La traiettoria di questa sequenza è riportata in Fig. 3, sovrapposta ai punti corrispondenti ai valori registrati fino al 2019.

Questa traiettoria ha la forma ad S della curva di diffusione delle innovazioni, il cui tratto iniziale di modesta pendenza è formato dagli  $x_2^t$  registrati fino al 2019: essa presenta un punto di svolta fra il 2021 e il 2022, oltre il quale la pendenza cresce notevolmente per un certo periodo di tempo, per andare poi a ridursi progressivamente tendendo verso il valore asintotico. La figura mostra che nei prossimi anni si dovrebbe verificare un netto incremento nella proporzione delle vendite di auto elettriche, che dovrebbe superare il 40% nel 2025 e raggiungere circa il 70% nel 2030, determinando una posizione di rilievo dell'auto elettrica nel mercato delle automobili. Anche se questi valori vanno accettati con prudenza, perché sono condizionati dal fatto che sia l'evoluzione di  $T^t$ , sia i parametri del processo di diffusione rimangano quelli stimati fino al 2019, essi pongono in evidenza che nei prossimi anni si dovrebbero avere profondi mutamenti nel mercato delle automobili, in favore dell'auto elettrica.

La Fig. 4 mostra la traiettoria delle vendite annue  $x_2^t T^t$  di auto elettriche a partire dal 2011. Anch'essa ha la caratteristica forma ad S della diffusione delle innovazioni e mostra che, se l'evoluzione nel tempo di  $T^t$  ed i parametri del processo rimangono quelli stimati fino al 2019, possiamo prevedere che il numero di vendite annue di auto elettriche in Europa sarà circa 7 milioni nel 2025 e supererà 11 milioni nel 2030.

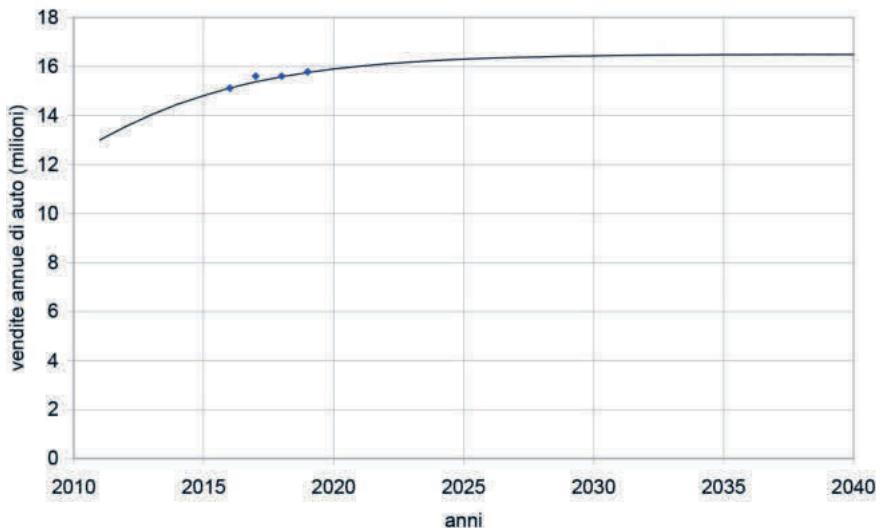


Figura 2 – Traiettoria delle vendite annue di auto in Europa fra il 2011 e il 2040 sovrapposta ai punti registrati fra il 2016 e il 2019.  
*Figure 2 – Trajectory of yearly sales of cars in Europe between 2011 and 2040 superimposed on the points recorded between 2016 and 2019.*

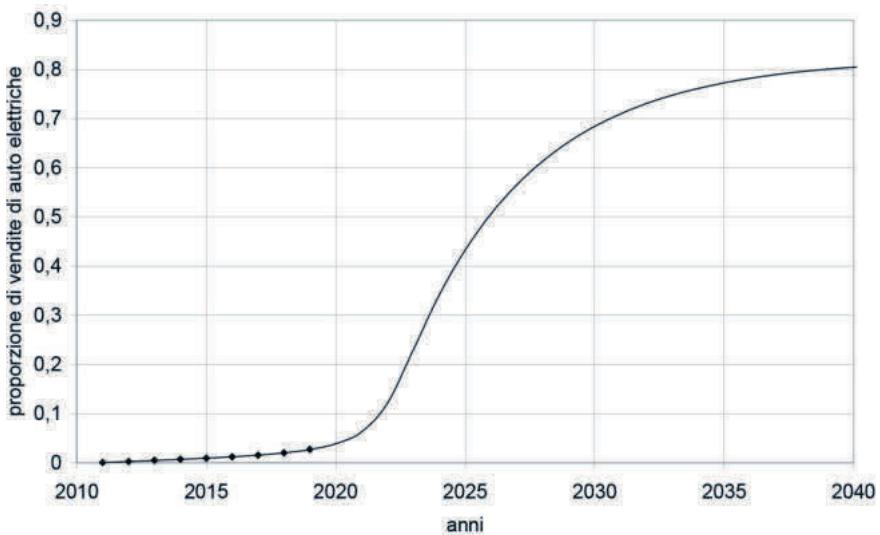


Figura 3 – Traiettoria della proporzione di vendite annue di auto elettriche in Europa fra il 2011 e il 2040 sovrapposta ai punti registrati fra il 2011 e il 2019.  
*Figure 3 – Trajectory of the proportions of yearly sales of electric cars between 2011 and 2019 in Europe superimposed on the points recorded between 2011 and 2019.*

which should exceed 40% in 2025 and reach about 70% in 2030, giving rise to a relevant position of the electric car in the car market. Even if these values must be accepted with caution, as they are conditioned by the fact that both the evolution of  $T^t$ , and the parameters of the diffusion process remain those estimated up to 2019, they show that substantial changes in the car market should occur in the coming years in favour of electric cars.

Fig. 4 shows the trajectory of yearly sales  $x_2^t T^t$  of electric cars starting from 2011. It also has the characteristic S

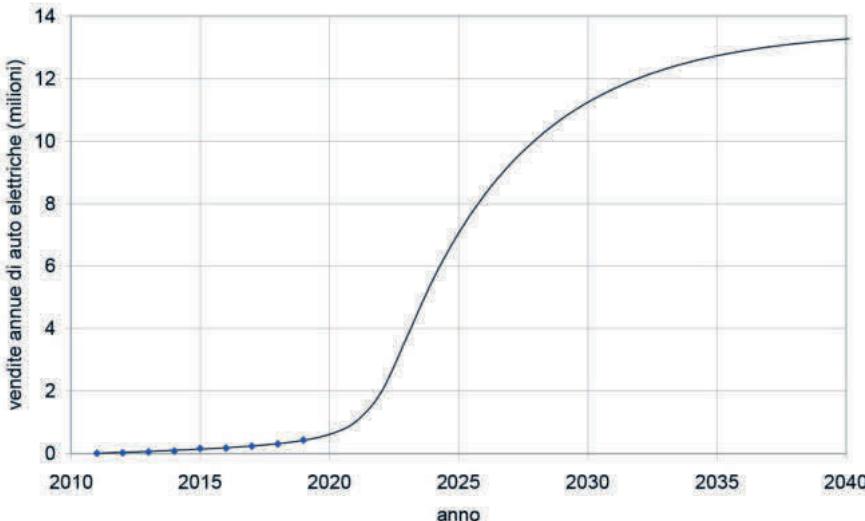


Figura 4 – Traiettoria delle vendite annue di auto elettriche in Europa fra il 2011 e il 2040 sovrapposta ai punti registrati fra il 2011 e il 2019.

Figure 4 – Trajectory of the yearly sales of electric cars in Europe between 2011 and 2040 superimposed on the points recorded between 2011 and 2019.

La Fig. 5 mostra l'andamento delle funzioni di costo  $c_i(x_i^t T^t)$  delle auto elettriche (curva continua) e di quelle MCI (curva tratteggiata), le cui espressioni sono date dalle (10). Si vede che all'inizio del processo di diffusione, quando le vendite sono ancora praticamente nulle, il costo relativo alle auto elettriche è molto elevato, a causa dell'incertezza dei potenziali compratori, ma diminuisce rapidamente all'aumentare del numero di vendite annue, e ad un certo punto diventa inferiore al costo delle auto MCI: questa rapida diminuzione è molto probabilmente dovuta in buona parte all'efficacia dell'azione degli *opinion leaders*. Si vede inoltre che il costo attribuito dai potenziali compratori alle auto MCI varia poco con la diffusione. Ciò è dovuto, come si è detto in precedenza, 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.

La figura mostra che, superato un certo numero di vendite annue, il costo delle auto elettriche rimane costante e inferiore a quello delle auto MCI. La costanza del costo all'aumentare della diffusione indica che l'incertezza dei potenziali compratori è scomparsa: il fatto che a questo punto il costo delle auto elettriche sia inferiore a quello delle auto MCI indica che, venuta meno l'incertezza, il giudizio dei potenziali compratori è più favorevole all'auto elettrica che all'altra.

shape of the diffusion of innovations and shows that, if the evolution over time of  $T^t$  and the process parameters remain those estimated up to 2019, we can anticipate that the yearly number of sales of electric cars in Europe will be about 7 million in 2025 and it will exceed 11 million in 2030.

Fig. 5 shows the pattern of cost functions  $c_i(x_i^t T^t)$  of electric cars (continuous line) and of ICE cars (broken line), whose expressions are given by Eq. (10). We see that at the beginning of the diffusion process, when sales are still practically zero, the cost relative to electric cars is very high, because of uncertainty of potential buyers, but it decreases quickly as the number of yearly sales increases, and at a certain point it becomes less than the cost of ICE cars: this rapid decrease is most likely due in large part to the effectiveness of the action of opinion leaders. Moreover we see in the figure that the cost attributed by potential buyers to ICE cars changes slightly with the diffusion. This is due, as mentioned previously, to the fact that uncertainty about the potential of ICE cars is very small, since these vehicles are on the market for a long time.

The figure shows that over a number of yearly sales the cost of electric cars remains constant and less than that of ICE cars. The constancy of cost as diffusion increases shows that the uncertainty of potential buyers has vanished: the fact that at this point the cost of electric cars is less than

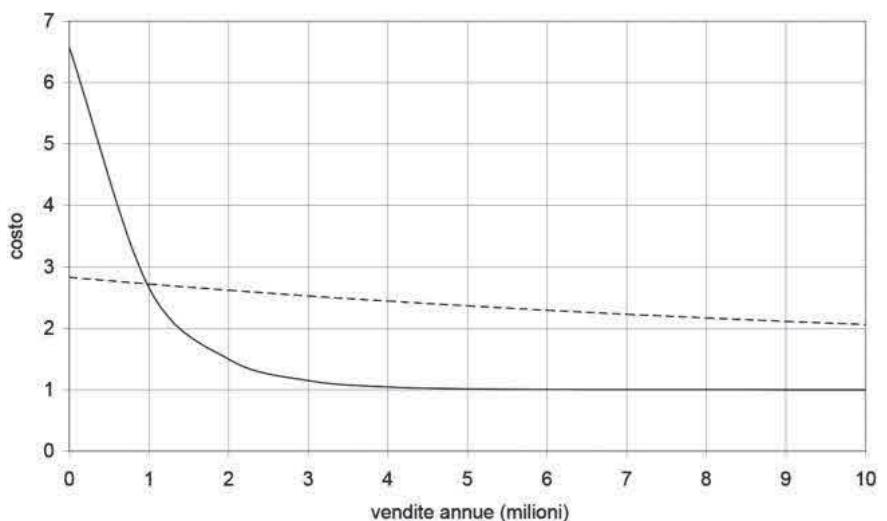


Figura 5 – Traiettorie delle funzioni di costo  $c_i(x_i^t T^t)$  per le auto MCI (linea tratteggiata) e per le auto elettriche (linea continua).

Figure 5 – Trajectories of cost functions  $c_i(x_i^t T^t)$  for ICE cars (broken line) and for electric cars (continuous line).

La sequenza dei valori di  $c_i(x_i^t T^t)$ ,  $i = 1, 2$ , calcolati attribuendo a  $x_i^t$  e a  $T^t$  i valori relativi ai successivi tempi  $t$ , individua la funzione del tempo  $\Psi_i(t) = c_i(x_i^t T^t)$ , la quale fornisce l'evoluzione nel tempo del costo attribuito dai potenziali compratori alle due tipologie di auto. La Fig. 6 mostra l'andamento di tale funzione nel periodo fra il 2011 e il 2040, per l'auto MCI (curva tratteggiata) e per l'auto elettrica (curva continua). Le due curve spiegano la forma ad S della curva di diffusione dell'auto elettrica.

Nei primi anni successivi all'immissione sul mercato dell'auto elettrica la curva ad essa relativa nella Fig. 6 mostra che i costi ad essa attribuiti sono molto maggiori di quelli che si leggono sulla curva relativa all'auto MCI. Ciò è dovuto al fatto che l'incertezza dei potenziali compratori relativa all'auto elettrica è molto alta ed essi attribuiscono ad essa un costo molto maggiore dell'altra. Da ciò segue che la proporzione di coloro che preferiscono l'auto elettrica è molto bassa, e altrettanto bassa è la proporzione delle vendite. Ma il costo dell'auto elettrica diminuisce rapidamente nel tempo come conseguenza dell'aumento delle vendite, e ad un certo punto, fra il 2021 e il 2022, la curva dell'auto elettrica interseca l'altra. A questo punto si verifica la svolta, perché il costo dell'auto elettrica diventa minore del costo dell'altra e continua a diminuire rapidamente nel tempo, mentre il costo dell'altra varia molto poco. La differenza fra i costi delle due auto cresce nel tempo e la proporzione di vendite di auto elettriche cresce altrettanto rapidamente. Però dopo l'intersezione fra le due curve il tasso di diminuzione del costo dell'auto elettrica inizia a ridursi progressivamente, e la differenza fra i costi delle due auto tende a diventare costante. Da ciò segue che il tasso di crescita nel tempo della proporzione delle vendite delle auto elettriche diminuisce, e la curva relativa tende progressivamente verso l'asintoto di equilibrio.

## 4. Conclusioni

La mobilità elettrica, i cui primi esemplari risalgono alla fine del XIX secolo, ha avuto una serie di cadute e di riprese durante il secolo scorso, fino all'inizio degli anni '80, quando l'attenzione nei suoi confronti ha ripreso vigore, essendo vista come un mezzo per mitigare l'inquinamento dell'aria nelle aree urbane. Tuttavia nei decenni trascorsi da quell'epoca le percentuali di vendite di auto elettriche rispetto al totale di auto vendute in Europa ha segnato una crescita molto scarsa. Ci si chiede pertanto se l'auto elettrica continuerà ad avere nel futuro una parte

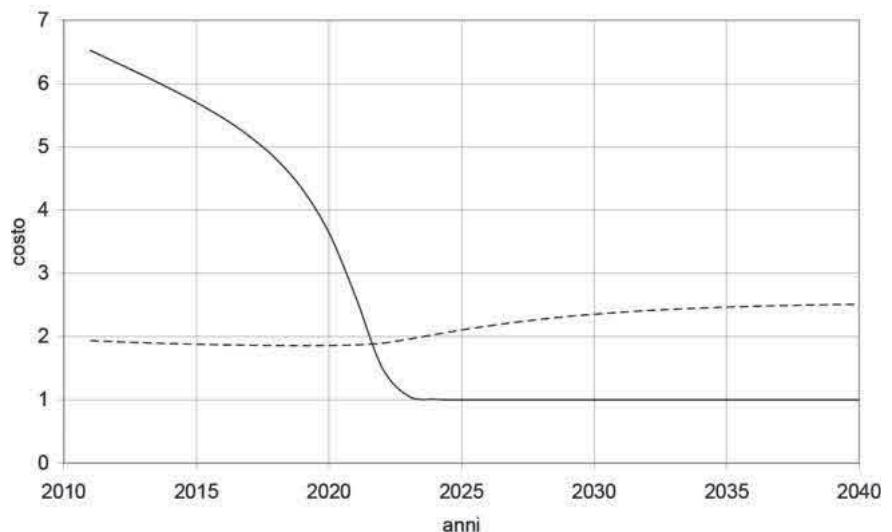


Figura 6 – Andamento della funzione  $\Psi_i(t)$ , la quale fornisce il costo attribuito dai potenziali compratori all'auto MCI (curva tratteggiata) e all'auto elettrica (curva continua) al variare del tempo fra il 2011 e il 2040.

Figure 6 – Pattern of function  $\Psi_i(t)$ , which furnishes the cost attributed by potential buyers to ICE car (broken line) and to electric car (continuous line) as time varies between 2011 and 2040.

that of ICE cars shows that, uncertainty having disappeared, the evaluation of potential buyers is more favourable to electric cars than to ICE cars.

The sequence of the values of  $c_i(x_i^t T^t)$ ,  $i = 1, 2$ , computed by assigning to  $x_i^t$  and to  $T^t$  the values corresponding to successive times  $t$ , defines the function of time  $\Psi_i(t) = c_i(x_i^t T^t)$ , which furnishes the evolution over time of the cost attributed by potential buyers to the two typologies of cars. Fig. 6 shows the pattern of this function in the time period between 2011 and 2040, for ICE car (broken line) and for electric car (continuous line). These two curves account for the S shape of the curve of the diffusion of electric car.

In the first years after the market entry of electric car the curve relative to the latter shows that its costs are much greater than those which we can read on the curve relative to ICE car. This is due to the fact that uncertainty of potential buyers about electric car is very high, and they assign to it a cost much greater than that of ICE car. From this it follows that the proportion of those who prefer electric car is very low and the proportion of sales is equally low. But the cost of electric car decreases quickly as time goes on, as a consequence of sales increase, and at a certain time, between 2021 and 2022, the curve of electric car intersects that of ICE car. At this time the tipping point occurs, as the cost of electric car becomes less than that of ICE car and it continues to decrease rapidly over time, while the cost of ICE car changes very little. The difference between the costs of the two cars increases over time and the proportion of sales of electric cars increases just as quickly. However after the intersection between the two curves the decrease rate of the cost of electric car begins to decrease progressively, and the

molto marginale nel mercato dell'automobile, o se invece le innovazioni tecnologiche introdotte avranno successo, per cui i dati sulle vendite finora raccolti rappresentano il primo tratto della curva ad S tipica della diffusione delle innovazioni, e saranno quindi seguiti da una svolta con un balzo nella percentuale delle vendite.

I dati finora raccolti appartengono al processo di diffusione dell'auto elettrica, e contengono quindi le informazioni riguardanti le caratteristiche di tale processo. Se si riesce ad utilizzare tali dati per ottenere queste informazioni, diviene possibile conoscere compiutamente il processo di diffusione e prevedere quindi la sua futura evoluzione.

Con l'obiettivo di estrarre dai dati noti sulle vendite delle auto in Europa le informazioni riguardanti il processo di diffusione dell'auto elettrica, è stato costruito un modello dinamico di competizione fra un'auto elettrica innovativa ed una MCI tradizionale. Il modello suppone che un individuo, che intende comperare un'auto, pone a confronto le due tipologie di veicoli, valutando vantaggi e svantaggi di ciascuno. Tali valutazioni sono affette da incertezza, la quale è in parte dovuta alla mancanza di conoscenza delle potenzialità di ciascun veicolo, in parte riguarda il futuro. La sintesi di tali valutazioni da parte di tutti i potenziali compratori per ciascuna delle due tipologie di veicoli è un numero ad essa attribuito, denominato *costo*, il quale è tanto più alto quanto più sfavorevole è la valutazione, e quanto più elevata è l'incertezza.

Il modello è basato su due ipotesi che derivano essenzialmente dall'esame dell'influenza dell'incertezza sul processo di diffusione: *a*) il costo attribuito a ciascuna tipologia di auto è funzione decrescente della sua diffusione; *b*) la proporzione di coloro che acquistano l'auto innovativa è una frazione della proporzione di coloro che la ritengono preferibile ad una tradizionale. Partendo dai dati delle vendite annue della nuova tipologia di auto, e delle vendite complessive di entrambe le tipologie, il modello consente di specificare il processo di diffusione dell'auto innovativa e di stimarne i parametri, in modo da poterne prevedere la futura evoluzione.

Il modello è stato applicato allo studio del processo di diffusione dell'auto elettrica in Europa. I dati utilizzati sono relativi al periodo fra il 2011 e il 2019. I dati riguardanti le vendite annuali di auto elettriche sono quelli raccolti dalla IEA [10], quelli relativi alle vendite complessive sono quelli raccolti dalla ACEA [1]. Non sono stati presi in considerazione i dati relativi agli anni precedenti il 2011, perché caratterizzati da vendite di auto elettriche assolutamente trascurabili.

I risultati della applicazione del modello mostrano che la curva di diffusione nel tempo dell'auto elettrica ha la forma ad S tipica della diffusione delle innovazioni in un contesto caratterizzato da incertezza dei potenziali compratori, sia con riferimento alla diffusione delle vendite annuali di auto elettriche, sia relativamente alla pro-

*difference in costs of the two cars tends to become constant. From this it follows that the growth rate over time of the proportions of sales of electric cars diminishes, and the relative curve tends towards its asymptote.*

### 4. Conclusions

*Electric mobility, whose first examples date back to the end of the 19<sup>th</sup> century, had a sequence of falls and recoveries during the last century, up to the early '80s, when it went into focus again, as it was seen as a means to mitigate air pollution in urban areas. However in the decades that have passed since that time the proportion of sales of electric cars to the total number of cars sold in Europe had a very poor growth. Thus the question arises whether the electric car will continue in the future to play a marginal role in the car market, or whether the technological innovations introduced will be successful, so that the data recorded so far belong to the first stretch of the S shaped curve of the diffusion of innovations, and thus they will be followed by a tipping point with a leap in the proportion of sales. The data collected so far belong to the process of the electric car diffusion, and thus they contain all information concerning the characteristics of the process. If we will be able to use these data to obtain this information, we will know completely the diffusion process and we will be able to predict its future evolution.*

*With the aim of extracting the information concerning the process of diffusion of the electric car from the data on car sales in Europe, we have developed a dynamical model of competition between an innovative car with electric propulsion and a traditional ICE car. The model supposes that an individual who intends to buy a car, compares the two typologies of vehicles evaluating advantages and disadvantages of each of them. These evaluations are affected by uncertainty, which is in part due to lack of knowledge of the potential of each vehicle, in part it concerns the future. The synthesis of these evaluation from all potential buyers for each of the two typologies of vehicles is a number attributed to it, named cost, which the higher is, the more unfavourable the evaluation is and the higher uncertainty is.*

*The model is based on two hypotheses which essentially derive from the analysis of the influence of uncertainty on the diffusion process.: a) the cost attributed to each type of car is a decreasing function of its diffusion; b) the proportion of those who buy an innovative car is only a fraction of the proportion of those who consider it preferable to the traditional one. Starting from the data of the annual sales of the new typology of car and of the overall sales of both typologies of cars, the model makes it possible to specify the diffusion process of the innovative car, and to estimate its parameters so that we can predict its future evolution.*

*The model has been applied to the study of the process of diffusion of electric car in Europe. The data used for this study are relative to the time period between 2011 and 2019. The data on electric car sales are those collected by IEA [10], those on the overall car sales are those collected by ACEA [1]. The data prior 2011 have not been considered, as they are characterized by negligible sales of electric cars.*

porzione rispetto alle vendite complessive. Il primo tratto di questa curva, di pendenza molto modesta, è quello individuato dai dati raccolti fra il 2011 e il 2019. La curva presenta una rapida svolta fra il 2021 e il 2022, con un rapido incremento sia delle vendite che della proporzione delle vendite. Si prevede quindi che nei prossimi anni si verificherà un netto incremento nella proporzione delle vendite di auto elettriche, la quale dovrebbe superare il 40% nel 2025, e raggiungere quasi il 70% nel 2030, determinando una posizione di assoluto rilievo dell'auto elettrica nel mercato dell'auto. Anche se questi risultati vanno accettati con prudenza, perché condizionati dal fatto che le caratteristiche del processo di diffusione si mantengano immutate almeno per un decennio, essi pongono in evidenza che nei prossimi anni si dovrebbero avere profondi mutamenti nel mercato delle auto, a favore dell'auto elettrica.

*The results of the application of the model show that the curve of the diffusion of electric car has the S shape typical of the diffusion of innovations in a context characterized by uncertainty of potential buyers, with reference to both the diffusion of yearly sales of electric cars, and that of the proportion to total sales. The first stretch of this curve, whose slope is very low, is that defined by the data collected between 2011 and 2019. The curve shows a tipping point between 2021 and 2022, with a rapid increase in both sales and proportion of sales. Thus we can predict that a sharp increase in the proportion of electric car sales will occur in the coming years, which should exceed 40% in 2025, and reach about 70% in 2030. Even if these values must be accepted with caution, as they are conditioned by the fact that the characteristics of the diffusion process remain unchanged at least for a decade, they show that substantial changes in the car market will occur in the coming years, in favour of electric car.*

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ACEA, 2020. "New passenger car registrations by country". Historical series 1990-2019.
- [2] CASCETTA E. (1998), "Modelli per i sistemi di trasporto". Teoria e applicazioni, p. 172, UTET, Torino.
- [3] CHAN C.C. (2017), "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles". Proceedings of the IEEE, Vol. 95.
- [4] COWAN R., HULTÉN S. (1996), "Escaping lock-in: the case of the electric vehicle". Technological Forecasting and Social Change 53, 61-79.
- [5] DALLA CHIARA B. (2019), "What evolutions and technological solutions are necessary for sustainable land transport systems". E3S Web of Conferences 119.
- [6] DALLA CHIARA B., PELLICELLI M. (2016), "Sustainable road transport from the energy and modern society points of view: Perspectives for the automotive industry and production". Journal of Cleaner production 133, 1283-1301.
- [7] FERRARI P. (2002), "Road network toll pricing and social welfare". Transp. Res. B 36, 471-483.
- [8] 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) 231-246, Springer-Verlag, Berlin.
- [9] HOYER K.G. (2008), "The history of alternative fuels in transportation: the case of electric and hybrid cars". Utilities Policy 16, 63-71.
- [10] IEA - International Energy Agency, 2020. Global EV outlook, [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [11] JALONEN H. (2012), "The uncertainty of innovation: A systematic review of the literature, Journal of Management Research", Vol. 4, 1, 1-47.
- [12] NELDER J.A., MEAD R. (1965), "A simplex method for function minimization". The Computer Journal 7, 308-313.
- [13] ORR G. (2003), *Diffusion of innovations*, Academia Edu.
- [14] ROGERS E.M. (2007), "Diffusion of innovations". In *Knowledge and innovation management* (Hoffmann V. Ed.) Universitat Hohenheim, 37-50.
- [15] VALENTE T.W. (1993), "Diffusion of innovations and policy decision making". Journal of communication 43, 30-45.
- [16] WANG Y., VASILAKOS A.V., MA J., XIONG N. (2014), "On studying the impact of uncertainty on behaviour diffusion in social networks". IEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Systems, Vol. 45, 2, 185-197.