

Università degli studi di Padova
Dipartimento di Scienze Statistiche
Corso di Laurea Magistrale in
Scienze Statistiche



**MODELLI DI DIFFUSIONE PER SERIE IN COMPETIZIONE:
UN'APPLICAZIONE DEL MODELLO DI LOTKA-VOLTERRA AL
MERCATO DELLE AUTO ELETTRICHE STATUNITENSI**

Relatore dott.ssa Mariangela Guidolin
Dipartimento di Scienze Statistiche

Laureanda Lucia Rapisarda
Matricola N 1130790

Anno Accademico 2018/19

“Per aspera ad astra”
-Cicerone

Indice

Introduzione	11
1 La diffusione delle innovazioni: modelli univariati e per competizione	15
1.1 Modello di Bass standard	17
1.2 Modelli per competizione	20
1.2.1 Modello di Lotka-Volterra	20
1.2.2 Modello di Lotka-Volterra standard: preda-predatore	21
1.2.3 Modello di Lotka-Volterra con “churn”	23
1.3 Modelli non lineari multivariati: aspetti di stima e inferenza statistica	28
1.3.1 Regressione non lineare	28
1.3.2 Algoritmo di Gauss Newton	30
1.3.3 Algoritmo di Levenberg-Marquardt	30
1.3.4 Aspetti inferenziali e analisi dei residui	31
1.4 Affinamento SARMAX e previsioni <i>out-of-sample</i>	35
1.5 Ambiti di applicazione dei modelli di Lotka-Volterra	37
1.6 Letteratura sui modelli di diffusione applicati a veicoli elettrici	38
2 Gli USA e i trasporti: impatto ambientale e soluzioni	45
2.1 Impatto ambientale del trasporto statunitense	46
2.2 Politiche “green” degli USA	48
2.3 Adozione dei veicoli elettrici in USA: stato del mercato, incen- tivi, modelli tecnologici	52

2.3.1	Vendite di veicoli elettrici a livello mondiale e negli USA	52
2.3.2	Incentivi all'adozione delle auto elettriche: un confronto tra USA e Italia	55
2.3.3	Tipologie di veicoli elettrici	59
3	Applicazione del modello di Lotka-Volterra alle serie di vendita mensili del mercato EV statunitense	63
3.1	Applicazione del modello di Bass	64
3.2	Stima del modello di Lotka-Volterra con "churn"	67
3.3	Stima dell'effetto della "cannibalizzazione" diretta	71
3.4	Affinamento SARMAX e previsioni <i>out-of-sample</i>	73
	Conclusioni	79
	Bibliografia	83

Elenco delle figure

1.1	La curva di adozione di Rogers	16
2.1	Emissioni di CO_2 per settore	47
2.2	Mappa degli USA indicante gli stati federali che offrono la vendita di auto elettriche a basso impatto ambientale	48
2.3	Vendite di auto elettriche e quota di mercato nei primi dieci paesi dell'EVI e in Europa, 2013-2017	53
2.4	Vendite plug-in per casa automobilistica/modello	54
2.5	Mappa degli USA indicante gli stati federali che offrono la vendita di auto elettriche in relazione agli incentivi	55
3.1	Serie di vendita istantanee Nissan Leaf	64
3.2	Serie di vendita istantanee Tesla S	65
3.3	Modello di Bass per la serie Nissan Leaf	67
3.4	Modello di Bass per la serie Tesla S	67
3.5	Serie mensili di vendita Nissan Leaf e Tesla S	68
3.6	Grafico serie di vendita istantanee Nissan Leaf e Tesla S e valori predetti dal modello LVch	70
3.7	Grafico serie di vendita di Nissan Leaf e Tesla S e valori predetti dal modello LVch nel caso della cannibalizzazione diretta	72
3.8	Previsioni out-of-sample per Nissan Leaf	75
3.9	Previsioni out-of-sample per Tesla S	77

Elenco delle tabelle

1.1	Modello di Lotka-Volterra e possibili casi particolari	26
1.2	Definizioni più frequentemente citate di cannibalizzazione delle vendite	27
3.1	Stime dei parametri di un modello Bass standard per Nissan-Leaf	66
3.2	Stime dei parametri di un modello Bass standard per Tesla . . .	66
3.3	Stima dei parametri del modello LVch	69
3.4	Stima dei parametri del modello LVch nel caso di cannibalizzazione diretta	73
3.5	Previsioni per Nissan Leaf tramite affinamento $SARMAX(6, 0, 4) \times (1, 0, 0)_{12} + 1$ regressore	74
3.6	Previsioni per Tesla S tramite affinamento $SARMAX(2, 0, 1) \times (1, 0, 6)_{12} + 1$ regressore	76

Introduzione

In un mondo in cui la globalizzazione e la rapida urbanizzazione stanno avendo implicazioni sempre più evidenti anche dal punto di vista climatico, la progettazione e realizzazione dei trasporti assume un ruolo chiave. In risposta a queste tendenze, l'innovazione dei trasporti urbani privati, sembra essere necessaria e trova soluzioni tecniche sempre più pratiche e convenienti offrendo una visione completamente nuova per i mercati emergenti.

Una delle soluzioni che i mercati odierni stanno sviluppando per cercare di rispettare gli accordi internazionali sulla salvaguardia del nostro clima (protocollo di Kyoto e accordo di Parigi) è quella legata all'innovazione del "combustibile" utilizzato nelle automobili. Sono state infatti create e sempre più perfezionate, le auto elettriche ad emissioni zero. Nella rosa dei Paesi che vantano la quota di veicoli elettrici più alta al mondo sul totale di quelli acquistati, ben tre fanno parte della regione all'estremo Nord dell'Europa: Norvegia, Islanda e Svezia. L'intera area, che si definisce "Nordic" e che comprende anche la Danimarca e la Finlandia, ha un patrimonio circolante elettrificato di 250.000 automobili: poche in termini assoluti, sono infatti solo l'8% a livello globale, anche se la regione rappresenta il terzo più grande mercato per questo tipo di auto in termini di volumi, dopo Cina e Usa. Qui l'elettrico detiene rispettivamente percentuali pari al 39%, 11.7% e 6.3% nel 2017 (dati OECD/IEA). Il successo delle auto elettriche si deve principalmente agli incentivi governativi: la Norvegia infatti ne è diventata la prima nazione al mondo dove nel 2018 le vendite sono cresciute del 40% e la quota di elettrico è salita al 49.1%, mentre la prospettiva per il 2019 è addirittura del 70% (Marseglia e Trigari (Marzo 2019)). Limitatamente ai paesi "Nordic" uno studio condotto da alcuni ricercatori della stessa area ha permesso di

analizzare attraverso la combinazione della teoria del “consumo vistoso” di Veblen e Banta (2009) e la diffusione dell’innovazione di Rogers (1983) come le concezioni del lusso e dello status influenzano il modo in cui una tecnologia relativamente nuova - quale appunto quella di un veicolo elettrico - si diffonde attraverso le società proponendone una nuova variazione teorica, che prende il nome di “diffusione notevole” (Noel et al. (2018)). Dallo studio si evince che tra gli EV dell’area considerata, Tesla rappresenta l’esempio migliore di innovazione che massimizza la visibilità e il confronto causato da “invidia”; gli altri veicoli elettrici, come la Nissan Leaf, invece, si affidano esclusivamente ad un cospicuo altruismo e quindi Tesla acquisisce in modo più completo la visibilità aderendo ai tradizionali canoni del consumo cospicuo posizionandosi come un marchio di lusso, mentre contemporaneamente coglie il cospicuo altruismo prendendo in considerazione la causa ambientalista.

Per sostenere la crescita dei modelli elettrici o PHEV, è fondamentale ampliare le opzioni di scelta per i consumatori, in tutti i segmenti di mercato. Da questo punto di vista la strada da percorrere è ancora lunga, basti pensare che al momento non ci sono utilitarie con motorizzazioni ibride plug-in. Altri elementi cruciali sono lo sviluppo dell’infrastruttura di ricarica, perché condiziona l’uso dell’auto nei percorsi interregionali e rappresenta una barriera psicologica (e non solo) all’acquisto, e la data di stop della vendita del diesel: la Norvegia, ancora una volta, l’ha fissata al 2025, prima di tutti. In Francia e UK l’anno limite è il 2040, per l’India il 2030 mentre gli USA non ne hanno ancora stabilito uno. C’è da dire comunque che i singoli produttori hanno fissato autonomamente date diverse. Nissan, per esempio, smetterà di vendere auto diesel in Europa nel 2021, Fiat Chrysler nel 2022, mentre Toyota ha già smesso alla fine dell’anno appena passato. Nonostante l’apparente incertezza strategica, gli Stati Uniti stanno investendo notevolmente sul comparto elettrico e varie case produttrici stanno puntando in questa direzione. In questo senso vale la pena studiare l’evoluzione del mercato delle auto elettriche negli Stati Uniti, al fine di cogliere le sue dinamiche interne e prospettare una futura evoluzione. A questa tipologia di mercato si applicheranno quindi i modelli di diffusione di innovazione per studiare e prevedere nel breve termine possibili cambiamenti relativamente ai meccanismi di competizione o collaborazione che possono instaurarsi tra le case produttrici di veicoli elet-

trici.

A tale scopo, saranno oggetto di analisi le serie mensili relative alle vendite degli autoveicoli elettrici Nissan Leaf e Tesla S, dal 2012 al 2019, negli Stati Uniti d'America; attraverso l'utilizzo di opportune strutture matematico-statistiche si descriverà l'evoluzione nel tempo dell'utilizzo di questa nuova tipologia di autovetture. I modelli utilizzati appartengono alla classe dei modelli di diffusione e nello specifico si procederà all'applicazione di alcune varianti del modello di Lotka-Volterra, che consente di identificare il ruolo della comunicazione e quindi della competizione in un processo di diffusione. Si cercherà di comprendere pertanto, se esistono dinamiche che favoriscono la predominanza di un brand automobilistico rispetto all'altro e da cosa questo dipenda.

La tesi è strutturata nel seguente modo. Nel primo capitolo si definiscono i modelli di diffusione con attenzione ai modelli univariati e ai modelli per competizione con approfondimenti relativi ad aspetti di stima e inferenza andando inoltre a fare un excursus della letteratura inerente ai modelli di diffusione applicati a veicoli elettrici e relative applicazioni dei modelli di Lotka-Volterra. Nel secondo capitolo ci si soffermerà sul contesto mondiale e statunitense in materia ambientale, per poi analizzare brevemente gli incentivi all'adozione delle auto elettriche in USA facendo un breve riferimento anche al caso italiano per dare un'idea della situazione nel nostro Paese. Il terzo capitolo è invece riservato all'applicazione di varianti del modello di Lotka-Volterra a due serie di vendita reali¹ sul mercato americano delle auto elettriche Nissan Leaf e Tesla S. Il quarto capitolo infine è riservato alle conclusioni.

¹<https://insideevs.com/news/352626/ev-sales-scorecard-may-2019/>.

Capitolo 1

La diffusione delle innovazioni: modelli univariati e per competizione

Le vendite di nuovi prodotti sul mercato sono influenzate da fattori interni ed esterni che possono essere controllabili o meno. Si definisce **diffusione** il processo di accettazione di una nuova invenzione o prodotto sul mercato. In questo contesto, la velocità con cui un nuovo prodotto si diffonde attraverso il mercato è chiamato tasso di diffusione e si assume che esistano quattro elementi chiave che concorrono nella diffusione di un prodotto: la misura di quanto un prodotto sia innovativo, il ruolo della comunicazione nel processo di diffusione, il tempo durante il quale ciò avviene e il sistema sociale che vi sta alla base. I modelli che si occupano di descrivere la velocità di diffusione di un prodotto e le serie temporali che concorrono nella definizione di ciclo di vita del prodotto stesso, si basano su teorie classiche che includono il concetto di classificazione dei cosiddetti *adottanti* (acquirenti), il ruolo dell'influenza sociale nell'adozione di un nuovo prodotto e la curva a forma di S associata al tasso di adozione di una innovazione (Figura 1.1). La diffusione di una innovazione è spesso modellata come una distribuzione normale nel tempo (Rogers, 1983).

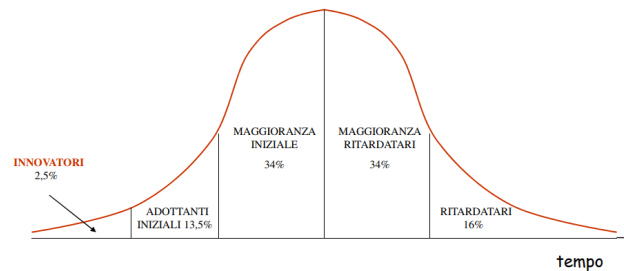


Figura 1.1: La curva di adozione di Rogers

Rogers, riprendendo la teoria di Ryan e Gross (1943) propone che gli adottanti di qualsiasi innovazione possano essere classificati come innovatori (2,5%), anticipatori (13,5%), maggioranza anticipatrice (34%), maggioranza ritardataria (34%) e ritardatari (16%), basati sulla curva a campana. Queste categorie, basate su deviazioni standard dalla media della curva normale, forniscono un linguaggio comune per i ricercatori sulla teoria dell'innovazione. La volontà e la capacità di ciascun adottante di adottare un'innovazione dipende dalla consapevolezza, dall'interesse, dalla valutazione, dalla sperimentazione e dall'adozione, fasi che vengono descritte da Rogers (1983) nel seguente modo:

- Fase della consapevolezza. L'individuo è esposto all'innovazione ma manca di informazioni complete a riguardo.
- Fase dell'interesse. L'individuo sviluppa interesse sull'innovazione e cerca ulteriori informazioni.
- Fase della valutazione. L'individuo applica mentalmente l'innovazione alla sua situazione presente e a quella futura, quindi decide se provarla o meno.
- Fase della sperimentazione. L'individuo sperimenta l'innovazione su piccola scala per determinarne l'utilità nella propria situazione.
- Fase dell'adozione. L'individuo decide di continuare il pieno uso dell'innovazione.

Conoscere a priori le dimensioni qualitative e quantitative di questi processi permette la messa a punto di opportune scelte strategiche la cui fruibilità dipende dalla velocità di penetrazione e dall'ampiezza del mercato. È quindi il modo attraverso cui un'innovazione viene conosciuta nel tempo dai possibili clienti che interagiscono tra loro scambiandosi informazioni, la base del processo di diffusione. La modellazione e la previsione della diffusione di un'innovazione sono tematiche molto discusse nella letteratura del marketing quantitativo ma possono essere applicate anche all'interno di sistemi socio-economici, biologici o fisici.

Come affermano Mahajan e Muller (1979), lo scopo dei modelli di diffusione è quello di “descrivere i successivi aumenti nel numero di adottanti e prevedere il continuo sviluppo di un processo di diffusione già in atto”. Viene utilizzata questa particolare categoria di modelli perchè usualmente i processi di adozione presentano un ciclo di vita relativamente breve e non sono sempre stazionari per gli effetti dovuti ai meccanismi di inizializzazione nella fase di lancio del prodotto e ai vincoli di saturazione nella fase finale del ciclo (Guseo, 2004). Le adozioni di un bene si sviluppano, in quattro fasi distinte: introduzione, crescita, maturità e declino. Nella prima fase si costruisce il mercato il più velocemente possibile in modo da acquisire una consistente quota di mercato; lo sforzo promozionale ha lo scopo di informare e incoraggiare la prova del prodotto. Nella seconda fase l'enfasi principale è sulla costruzione del mercato; lo sforzo promozionale è finalizzato a incoraggiare la ripetizione dell'adozione. Nella terza fase si mantiene la quota di mercato; lo sforzo promozionale è rivolto a stimolare fedeltà alla marca. Nell'ultima fase gli investimenti vengono ridotti drasticamente e si ricava profitto dalle ultime vendite.

Nella seguente sezione sarà introdotto uno dei modelli di diffusione più noti nella letteratura di riferimento: il modello di Bass standard.

1.1 Modello di Bass standard

Il modello di Bass standard (Bass, 1969), ha una crescita di tipo limitato o a saturazione ed è descritto dalla seguente equazione differenziale di primo ordine:

$$z'(t) = \left(p + q \frac{z(t)}{m} \right) (m - z(t)) \quad (1.1)$$

che può essere riscritta

$$z'(t) = p(m - z(t)) + q \frac{z(t)}{m} (m - z(t)) \quad (1.2)$$

Il termine $z'(t)$ sta ad indicare le vendite istantanee del prodotto considerato. Dall'equazione (1.1) notiamo che le vendite istantanee $z'(t)$ sono proporzionali al mercato residuo $(m - z(t))$, moltiplicato per due fattori, p e $q \frac{z(t)}{m}$, che descrivono il comportamento di due gruppi di consumatori, gli **innovatori**, che sono coloro che comprano per primi sulla base di un convincimento personale, maturato, ad esempio, tramite la pubblicità e i mass media, e gli **imitatori**, che sono coloro che adottano in un secondo momento imitando le scelte degli altri attraverso l'effetto del cosiddetto WOM (*word-of-mouth*), ovvero che l'effetto passaparola che si crea quando sono i consumatori stessi, attraverso le loro opinioni in merito al prodotto acquistato, ad influenzare positivamente o meno altri potenziali clienti all'acquisto del prodotto (Guseo, 2004). L'equazione 1.2 invece ci permette di capire che la variazione istantanea della crescita è data dalla somma di due componenti: il primo addendo che è dato da $p(m - z(t))$, esprime con il parametro p l'effetto *innovativo* del processo direttamente proporzionale al residuo che si riduce nel tempo. Il secondo addendo esprime con il parametro q , controllato da una componente inerziale, l'effetto *imitativo* del processo a sua volta direttamente proporzionale al residuo e quindi nullo all'origine e asintoticamente per $t \rightarrow \infty$.

Se si pone $\frac{z(t)}{m} = y(t)$ l'equazione del modello assume una forma equivalente

$$y'(t) = (p + qy(t))(1 - y(t)) \quad (1.3)$$

dove y è una funzione di ripartizione e y' è la corrispondente densità. La ripartizione si riferisce all'indice temporale espresso da t ed è quindi la pro-

babilità che l'evento si sia verificato non oltre t . Nel caso del modello di Bass quindi la probabilità di adozione, condizionatamente al fatto che non si è già adottato, è uguale alla somma delle probabilità di due eventi indipendenti: p e qy ; tale aspetto evidenzia come non si possa essere quindi contemporaneamente innovatori e imitatori.

La soluzione in forma chiusa del modello di Bass è definita come:

$$y(t) = F(t; p, q) = \left(\frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}} \right) \quad t > 0 \quad (1.4)$$

ovvero, avendo posto $z = ym$

$$z(t) = m F(t; p, q) = m \left(\frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}} \right) \quad t > 0 \quad (1.5)$$

Le vendite cumulate $z(t)$ sono espresse in funzione dei parametri p e q . Il controllo dell'asintoto superiore è dovuto a m . In questo caso il mercato potenziale che è rappresentato dal parametro m , agisce come parametro di scala del processo di diffusione ed è assunto costante durante tutto il ciclo di vita.

Secondo Bass ci sono due condizioni per le quali il modello è appropriato per la previsione delle vendite a lungo termine della nuova tecnologia:

1. la nuova tecnologia è stata introdotta sul mercato per il quale si osservano le vendite nel periodo di tempo.
2. la nuova tecnologia non è stata ancora introdotta, ma potrebbe avere un comportamento di mercato simile ad una tecnologia esistente con parametri di adozione noti.

Il modello di Bass ha però diverse limitazioni (Guseo, 2004):

- il modello viene utilizzato per prevedere il tasso di adozione di una nuova tecnologia presumendo che sul mercato non esista alcuna tecnologia alternativa concorrente.

- si considera un mercato potenziale che rimane costante durante l'intero ciclo di vita.

Nel paragrafo seguente verrà introdotta una categoria di modelli il cui scopo è quello di superare i limiti del modello di Bass inerenti al problema della concorrenza fra prodotti: i cosiddetti modelli per competizione.

1.2 Modelli per competizione

Una delle maggiori limitazioni dei modelli di diffusione univariati è, ovviamente, il fatto di non considerare la competizione tra prodotti. La presenza di concorrenti è invece un aspetto di grande importanza in quanto può agire sia da stimolo che da barriera per la diffusione di un nuovo prodotto. I concorrenti possono entrare nel mercato insieme e quindi il loro ciclo di vita essere simultaneo (*competizione sincronica*), oppure, più tipicamente, un prodotto entra nel mercato da monopolista e altri concorrenti entrano in un secondo momento. In questo caso si parla di competizione *diacronica*. Tra i modelli possibili che consentono di studiare le varie dinamiche consideriamo il caso della classe dei **modelli di Lotka-Volterra**. È importante osservare che in questo caso, la competizione sarà analizzata solo fra due concorrenti poiché la costruzione di sistemi di equazioni con più di due serie risulta essere di difficile gestione (Guseo e Mortarino (2013)).

1.2.1 Modello di Lotka-Volterra

Breve cenni storici

Il modello che viene qui introdotto trova le sue origini tra il 1924 e il 1926 grazie al demografo americano Alfred James Lotka e al matematico italiano Vito Volterra. Nel 1925, durante una conversazione con Umberto D'Ancona, giovane zoologo, Volterra apprese di una curiosa circostanza nelle statistiche dei mercati ittici dell'Adriatico. Risultò che durante la Prima Guerra Mondiale, e immediatamente dopo, quando le attività di pesca erano drasticamente diminuite, era in compenso aumentato il numero di predatori tra i

pesci catturati. Le motivazioni del modello di Volterra miravano a spiegare perchè la popolazione di una specie di predatori (una specie di squali) fosse aumentata a fronte della diminuzione di popolazione di una specie preda (le sardine). Il suo modello può essere visto come il primo della categoria dei modelli consumatore-risorsa. L'idea di fondo del modello è mettere in risalto il fatto che le evoluzioni di popolazione delle due specie non sono né indipendenti né compatibili ma si influenzano a vicenda in quella che potremmo chiamare “lotta per la sopravvivenza”. Il modello originale non teneva conto della disomogeneità ambientale e della presenza di altre specie. Negli anni il modello è stato adattato a situazioni realistiche riguardanti l'analisi di prodotti.

1.2.2 Modello di Lotka-Volterra standard: preda-predatore

L'idea generale del modello di Lotka-Volterra è quella di considerare uno scenario ideale in cui coesistono due specie: i predatori e le loro prede.

Le ipotesi alla base di questo modello sono le seguenti:

- se il consumo è assente, la risorsa si sviluppa come una singola popolazione fino al raggiungimento della capacità portante (*carrying capacity*) consentita dall'ambiente di riferimento. Tale regime stazionario è un equilibrio dovuto al meccanismo di autocontesa che non consente ad un “organismo” uno sviluppo senza limiti;
- se viene meno la risorsa, il consumo diventa nullo e quindi si estinguono i consumatori;
- il trasferimento della risorsa è l'unica relazione tra le due popolazioni.

Le variazioni istantanee delle due popolazioni possono essere rappresentate come segue,

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \Phi(x) - yp(x), \\ \frac{dy}{dt} = -\mu y + eyp(x), \end{cases} \quad (1.6)$$

dove $x = x(t)$ rappresenta lo stock della risorsa, $\Phi(x)$ definisce la dinamica del suo accrescimento, $p(x)$ descrive il saggio variabile di consumo per ogni

consumatore e y rappresenta lo stock dei consumatori. Nella prima equazione si descrive la variazione istantanea della risorsa come differenza tra il livello di crescita raggiunto ed il consumo espresso. Nella seconda equazione si tiene conto del tasso di mortalità dei consumatori μ e dell'efficienza e di utilizzo della risorsa consumata (Guseo, 2014).

Modelli di Lotka-Volterra generalizzati

Uno dei punti chiave da considerare quando si studia la penetrazione di un nuovo prodotto in un mercato è come abbiamo già detto, la presenza di concorrenti. Concorrenza su prodotti, tecnologie o, più in generale, paradigmi scientifici, possono essere interpretati attraverso rappresentazioni di sistemi complessi ottenendo specifiche distribuzioni asimmetriche nel tempo (Bornholdt, Jensen e Sneppen, 2011). La competizione può alterare le dinamiche del ciclo di vita in termini di velocità di penetrazione, del tempo che si impiega per raggiungere il picco massimo e delle dimensioni del mercato potenziale. I prodotti concorrenti possono rappresentare un ostacolo al successo di un prodotto, ma allo stesso tempo la loro presenza può aumentare la dimensione della domanda, implicando in tal modo un vantaggio per tutti gli attori del mercato.

Sono state realizzate diverse generalizzazioni del modello di Lotka-Volterra. Una delle più importanti è quella di Abramson e Zanette e prende il nome di LVC (*Lotka-Volterra competition model*) (Abramson e Zanette, 1998) in cui si rappresenta il seguente sistema di equazioni:

$$\frac{dz_i}{dt} = z_i \left[r_i - \sum_{j=1}^M a_{ij} z_j \right], \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1.7)$$

Esso è quindi un'estensione del modello logistico perché incorpora una parte che descrive gli effetti della concorrenza esterna tra individui di specie diverse. Un ulteriore caso particolare per $M = 2$ è sviluppato nello studio di Morris e Pratt (2003) in cui si descrivono gli aspetti competitivi concernenti due

tecnologie antagoniste. Il modello proposto è del tipo

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = a_1 \frac{z_1}{m_1} (m_1 - z_1 - \alpha_{12} z_2), \\ \frac{dz_2}{dt} = a_2 \frac{z_2}{m_2} (m_2 - z_2 - \alpha_{21} z_1) \end{cases} \quad (1.8)$$

dove z_1 e z_2 sono le popolazioni associate alle due tecnologie, ad esempio i volumi di vendita già effettuati, m_1 e m_2 sono le dimensioni potenziali dei due mercati specifici, α_{12} e α_{21} sono i parametri di calibrazione della competizione e misurano la forza di inibizione dell'antagonista sulla percezione locale del mercato residuo puro, $m_i - z_i$, $i = 1, 2$. In altre parole α_{12} è il coefficiente che misura l'effetto concorrenziale che la popolazione 2 ha sulla popolazione 1 e viceversa per α_{21} mentre a_1 e a_2 sono i tassi di crescita dei prodotti 1 e 2, rispettivamente. Viene misurata quindi la competizione esterna rispetto a quella interna, cioè quanti individui della specie 1 sono equivalenti agli individui della specie 2. I coefficienti interspecifici identificano le diverse influenze che le due specie esercitano reciprocamente e che condizionano intensamente la loro intera evoluzione competitiva. Il sistema di equazioni considerato non ha soluzione analitica, ma soluzioni approssimate sono facilmente calcolabili numericamente.

1.2.3 Modello di Lotka-Volterra con “churn”

I modelli finora proposti in letteratura che trattano della concorrenza nella produzione di nuovi prodotti, hanno limitato la loro attenzione alle condizioni duopolistiche poichè gestire contemporaneamente sistemi di equazioni differenziali è molto difficoltoso (Guseo e Mortarino (2013)). In questo ambito, un altro elemento importante è certamente il mercato residuo che può essere anche oggetto di competizione. Nello studio di Guidolin e Guseo (2015), si formula il modello di Lotka-Volterra con “churn”, LVch, un sistema di equazioni differenziali che descrive i processi di due adozioni e delle relative interazioni, definito come segue

$$\begin{aligned}
z_1'(t) &= \left[p_{1a} + q_{1a} \frac{z_1(t)}{m_a} \right] [m_a - z_1(t)] \quad t \leq c_2, \\
z_1'(t) &= \left[p_{1a} + \frac{a_1 z_1(t) + \alpha_2 b_1 z_2(t)}{m_1 + \alpha_2 m_2} \right] [(m_1 - z_1(t)) + \alpha_2 (m_2 - z_2(t))] \\
z_2'(t) &= \left[p_{2a} + \frac{a_2 z_2(t) + \alpha_1 b_2 z_1(t)}{m_2 + \alpha_1 m_1} \right] [(m_2 - z_2(t)) + \alpha_1 (m_1 - z_1(t))].
\end{aligned} \tag{1.9}$$

La prima equazione del sistema (1.9) descrive la fase autonoma quando il primo prodotto agisce da monopolista nel mercato. Si presume che il prodotto si comporti secondo un modello di Bass standard, con $z_1'(t)$ e $z_1(t)$ come tasso di vendita e vendite cumulate, rispettivamente; i parametri m_a , il potenziale di mercato, p_{1a} , il coefficiente di innovazione dovuto all'informazione esterna e q_{1a} , il coefficiente di imitazione dovuto al passaparola. La seconda e la terza equazione sono definite per $t > c_2$ quando il secondo prodotto è entrato nel mercato e descrivono le dinamiche della competizione. Ciascun tasso di vendita del prodotto, $z_i'(t)$, $i = 1, 2$, per $t > c_2$, è proporzionale al corrispondente mercato residuo $[(m_i - z_i(t)) + \alpha_j (m_j - z_j(t))]$, $i = 1, 2$, $j = 1, 2$, $i \neq j$ dove m_i sono i potenziali di mercato specifici del prodotto in competizione, e $z_i(t)$, $i = 1, 2$, rappresentano le vendite cumulate al tempo t . Il mercato residuo in questo caso è dato dalla somma del contributo specifico del prodotto $m_i - z_i(t)$ più una frazione dell'altro, $\alpha_j (m_j - z_j)$. I parametri α_j , $j = 1, 2$, modulano la dimensione di questo secondo elemento. I parametri p_i , $i = 1, 2$, definiscono il comportamento innovativo nel processo di adozione, mentre i componenti del passaparola hanno una struttura più complessa, rispetto ai modelli standard di tipo LV, costituiti da un elemento interno al prodotto $[a_1 z_1(t)/(m_1 + \alpha_2 m_2)]$ e da un prodotto incrociato, $[\alpha_2 b_1 z_2(t)/(m_1 + \alpha_2 m_2)]$ (contributo dell'antagonista), per il primo concorrente e, analogamente, $[a_2 z_2(t)/(m_2 + \alpha_1 m_1)]$ e $[\alpha_1 b_2 z_1(t)/(m_2 + \alpha_1 m_1)]$ per il secondo. Mentre i parametri a_1 e a_2 sono sempre positivi perché descrivono il passaparola interno al prodotto, che è autosufficiente e quindi positivo, i parametri b_1 e b_2 possono essere positivi o negativi, perché il *passaparola incrociato* può essere positivo o negativo suggerendo una collaborazione o una

competizione tra i due prodotti, rispettivamente. Il segno del valore relativo al *passaparola incrociato* che può essere sia positivo che negativo, dipende interamente dal segno di b_1 e b_2 poiché il parametro α_j , $j = 1, 2$ è sempre positivo.

È interessante notare che la modulazione dei parametri α_1 e α_2 consente l'isolamento di alcuni casi specifici, utili per rappresentare diversi ambienti di mercato, come segue (Guidolin e Guseo, 2018):

1. Se $0 < \alpha_1 < 1$ e $0 < \alpha_2 < 1$, si ha il modello completo di LVch, in cui entrambi i prodotti sono influenzati dal passaparola incrociato e dal passaparola interno in cui ognuno può avere accesso a una parte del mercato residuo dell'altro;
2. se $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, il modello LVch si riduce a UCRCD (Guseo e Mortarino, 2013). In questo caso, il mercato potenziale è una risorsa comune $m = m_1 + m_2$, e il residuo $m - z(t)$, con $z(t) = z_1(t) + z_2(t)$, è completamente accessibile a entrambi i concorrenti;
3. se $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, non c'è competizione tra i due prodotti, che sono in realtà descritti attraverso modelli Bass standard indipendenti;
4. se $\alpha_1 = 1$ e $\alpha_2 = 0$, il ciclo di vita del primo prodotto è descritto con un modello Bass standard indipendente. Il mercato residuo del secondo prodotto è costituito dalla somma di entrambi i mercati residui, $(m_2 - z_2(t)) + (m_1 + z_1(t))$ perché $\alpha_1 = 1$. In questo senso, si può vedere l'asimmetria totale della competizione, in cui il secondo prodotto ha accesso completo al mercato residuo del primo. Allo stesso tempo, il primo prodotto può ancora avere un impatto sulle vendite del secondo tramite *cross-product word-of-mouth*, $[\alpha_1 b_2 z_1(t) / (m_2 + \alpha_1 m_1)]$, che può essere sia positivo che negativo dal momento che dipende dal segno del parametro b_2 . Questo è il caso della cosiddetta *cannibalizzazione diretta*;
5. se $\alpha_1 = 0$ e $\alpha_2 = 1$, valgono considerazioni simili. In questo caso, il primo prodotto agisce come un concorrente vincente, cannibalizzando

il mercato del secondo, mentre il secondo è descritto con un modello Bass standard indipendente. Questo caso illustra un particolare tipo di cannibalizzazione, che chiamiamo *cannibalizzazione inversa del prodotto* (Guidolin e Guseo, 2018).

Ciò è riassunto nella tabella 1.1.

Tabella 1.1: Modello di Lotka-Volterra e possibili casi particolari

	Prodotto 1	Prodotto 2
Lotka-Volterra con churn, LVch	$0 < \alpha_2 < 1$	$0 < \alpha_1 < 1$
UCRCD	$\alpha_2 = 1$	$\alpha_1 = 1$
Modello di Bass	$\alpha_2 = 0$	$\alpha_1 = 0$
Cannibalizzazione diretta	$\alpha_2 = 0$	$\alpha_1 = 1$
Cannibalizzazione inversa	$\alpha_2 = 1$	$\alpha_1 = 0$

Nel prosieguo della tesi, si andrà a trattare lo specifico caso della competizione asimmetrica ed in particolare si cercherà di capire se esista un possibile effetto di cannibalizzazione ¹ tra i due brand che si andranno ad esaminare. Avere dunque una panoramica concettuale ed una definizione completa di cannibalizzazione delle vendite risulta, in questo caso, un requisito fondamentale per poter comprenderne il suo scopo. Come afferma Novelli (2013), non esiste una definizione generalmente accettata di cannibalizzazione e la tabella 1.2 mostra le definizioni più famose in merito.

¹Seppur con un'accezione leggermente impropria, usiamo il termine cannibalizzazione in quanto nonostante le serie storiche dei prodotti che si andranno a considerare non appartengono allo stesso brand, fanno comunque parte della stessa categoria di mercato, nel nostro caso le auto elettriche.

Tabella 1.2: Definizioni più frequentemente citate di cannibalizzazione delle vendite

Fonte	Definizione
Heskett (1976)	Il processo mediante il quale un nuovo prodotto guadagna una parte delle sue vendite deviandole da un prodotto esistente.
Kerin, Harvey e Rothe (1978)	Entrate “ridistribuite”, in quanto gli acquirenti esistenti stanno sostituendo un articolo con un altro nel portafoglio di prodotti dell’azienda.
Moorthy (1984)	Concorrenza all’interno della propria linea di prodotti.
Mason e Milne (1994)	La misura in cui i clienti di un prodotto lo sono a scapito di altri prodotti offerti dalla stessa impresa.

Si possono ritrovare tre parti costitutive comuni evidenti:

1. le entità economiche le cui vendite generate beneficiano o soffrono del verificarsi del fenomeno.
2. il comune ambito organizzativo a cui appartengono i loro ricavi.
3. la relazione specifica che collega i loro processi generatori di vendite.

Un altro elemento cardine nella definizione di cannibalizzazione è il contesto entro il quale il fenomeno può essere correttamente chiamato cannibalizzazione rispetto ad un disegno competitivo. I modelli per cannibalizzazione vengono rilevati correttamente confrontando la decisione di acquisto effettiva con quella ipotetica che sarebbe stata presa in assenza dell’elemento “cannibale”. In altre parole, quelli tra i clienti del cannibale che avrebbero comprato la “vittima”, se il cannibale non fosse stato nel loro set di scelta disponibile, sono qualificati come cannibalizzati.

In conclusione, Novelli (2013) propone di definire la cannibalizzazione come un fenomeno intra-organizzativo di differenziazione delle vendite mediante il quale le vendite di un prodotto o servizio (il cannibale) sono generate deviando potenziali vendite che un prodotto o servizio sostitutivo (la vittima)

avrebbe ottenuto in assenza del primo, *ceteris paribus*, all'interno di un comune ambito organizzativo che raccoglie i ricavi di entrambi.

In parole povere, la cannibalizzazione tradizionale vede il secondo entrante "mangiare" il primo; in questa circostanza il modello statistico assume la forma che segue:

$$\begin{aligned} z_1'(t) &= \left[p_{1a} + q_{1a} \frac{z_1(t)}{m_a} \right] [m_a - z_1(t)] \quad t \leq c_2, \\ z_1'(t) &= \left[p_1 + \frac{a_1 z_1(t)}{m_1} \right] [m_1 - z_1(t)] \\ z_2'(t) &= \left[p_2 + \frac{a_2 z_2(t) + b_2 z_1(t)}{m_2 + m_1} \right] [(m_2 - z_2(t)) + (m_1 - z_1(t))] \end{aligned} \quad (1.10)$$

In questo caso come abbiamo già enunciato nel paragrafo 1.2.3 il ciclo di vita del primo prodotto è descritto da un modello di Bass standard mentre il ciclo di vita del secondo prodotto è descritto da un modello di Lotka-Volterra nel quale il mercato residuo è la somma di entrambi i mercati residui.

1.3 Modelli non lineari multivariati: aspetti di stima e inferenza statistica

Per poter stimare il modello di Bass e i modelli per competizione, è stato verificato come il metodo dei minimi quadrati lineari (OLS) tenda a fornire parametri di segno negativo e che per i modelli specificati essi risultino poco ragionevoli e sintomo di una generale debolezza strutturale del modello. Per questo motivo viene utilizzato solitamente il criterio dei minimi quadrati non lineari (NLS), che verrà illustrato nel paragrafo 1.3.1 assieme ai più noti metodi di stima utilizzati in questi casi (si veda Seber e Wild (1989)).

1.3.1 Regressione non lineare

Si consideri un modello del tipo

$$y_i = f(x_i; \vartheta^*) + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.11)$$

dove f è una relazione funzionale nota, $E[\varepsilon_i] = 0$, x_i è un vettore di dimensione $k \times 1$ che è formato dalle variabili esplicative della funzione (nel caso dei modelli di Bass l'unica variabile indipendente è t), mentre ϑ^* è il vero valore, incognito, di ζ ed esso appartiene a Θ , un sottoinsieme di R^p . Si denoti con $\hat{\zeta}$ una stima dei minimi quadrati di ϑ , ottenuta minimizzando la devianza $S(\vartheta)$ ovvero la somma dei quadrati degli scarti tra le osservazioni y_i ed il modello $f(x_i; \vartheta)$

$$S(\zeta) = \sum_1^n [y_i - f(x_i; \vartheta)]^2 \quad (1.12)$$

in $\vartheta \in \Theta$.

A differenza del caso lineare, $S(\vartheta)$ può avere vari minimi locali oltre al minimo assoluto $\hat{\vartheta}$. Quando ogni $f(x_i; \vartheta)$ è differenziabile in ϑ , allora $\hat{\vartheta}$ soddisfa il seguente sistema di equazioni normali,

$$\frac{\partial S(\vartheta)}{\partial \vartheta_r |_{\hat{\vartheta}}} = 0, \quad r = 1, 2, \dots, p. \quad (1.13)$$

Si usi, per semplicità, la notazione $f_i(\vartheta) = f(x_i; \vartheta)$ e si avrà

$$f(\vartheta) = (f_1(\vartheta), f_2(\vartheta), \dots, f_n(\vartheta))' \quad (1.14)$$

e

$$F.(\vartheta) = \frac{\partial f(\vartheta)}{\partial \vartheta'} = \left[\left(\frac{\partial f_i(\vartheta)}{\partial \vartheta_r} \right) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad r = 1, \dots, p \quad (1.15)$$

la matrice jacobiana $n \times p$ delle derivate parziali prime di f rispetto a ϑ' . Talvolta per ragioni di semplicità si pone $F. = F.(\vartheta)$.

Usando la notazione vettoriale, la devianza può essere riscritta come

$$S(\vartheta) = [y - f(\vartheta)]'[y - f(\vartheta)]. \quad (1.16)$$

Derivando l'equazione 1.16 rispetto a ϑ ed eguagliando a zero si hanno le usuali equazioni normali, in particolare,

$$-2F'.(y - f(\vartheta)) = 0 \quad (1.17)$$

ovvero

$$F'.(y - f(\vartheta)) = 0 \quad (1.18)$$

cui corrisponde una soluzione $\hat{\vartheta}$, sotto l'ipotesi di ortogonalità $F \perp \varepsilon$.

Per la maggior parte dei modelli non lineari non è possibile una risoluzione analitica, fatto che rende necessario l'uso di metodi di stima iterativi.

1.3.2 Algoritmo di Gauss Newton

L'algoritmo di Gauss-Newton è ottenibile a partire da un'approssimazione in serie di Taylor di $f_i(\vartheta)$, troncata al primo ordine, in un intorno di $\vartheta^{(a)}$, dove $\vartheta^{(a)}$ è un vettore di parametri ritenuto una buona approssimazione, come punto di partenza, della stima $\hat{\vartheta}$. Si ha quindi:

$$f(\vartheta) \approx f(\vartheta^{(a)}) + \frac{\partial f(\vartheta^{(a)})}{\partial \vartheta'}(\vartheta - \vartheta^{(a)}) \quad (1.19)$$

dove $\frac{\partial f(\vartheta^{(a)})}{\partial \vartheta'} = F \cdot(\vartheta^{(a)})$, utilizzando la notazione precedente.

Usando l'approssimazione 1.19 si ottiene:

$$\begin{aligned} S(\vartheta) &= [y - f(\vartheta)]'[y - f(\vartheta)] \approx \\ &\approx [y - f(\vartheta^{(a)}) - F \cdot^a(\vartheta - \vartheta^{(a)})]'[y - f(\vartheta^{(a)}) - F \cdot^a(\vartheta - \vartheta^{(a)})] \\ &= [z^{(a)} - F \cdot^a \beta]'[z^{(a)} - F \cdot^a \beta], \end{aligned}$$

dove si è posto $z^{(a)} = y - f(\vartheta^{(a)})$ e $\beta = (\vartheta - \vartheta^{(a)})$.

Con la nuova notazione, le equazioni precedenti sono ricondotte ad un modello lineare nel parametro β , risolvibile come segue:

$$\hat{\beta} = (F \cdot^{(a)'} F \cdot^{(a)})^{-1} F \cdot^{(a)'} z^{(a)}. \quad (1.20)$$

Si giunge quindi alla formulazione dell'algoritmo di Gauss-Newton:

$$\vartheta^{(a+1)} = \vartheta^{(a)} + \delta(a), \quad (1.21)$$

dove $\delta(a) = \hat{\beta} = \vartheta^{(a+1)} - \vartheta^{(a)} = (F \cdot^{(a)'} F \cdot^{(a)})^{-1} F \cdot^{(a)'} (y - f(\vartheta^{(a)}))$.

Il meccanismo iterativo si arresta quando viene raggiunto il minimo per $S(\vartheta)$, cioè quando $\delta^{(a)}$ è nullo. Si ritiene accettabile un risultato nel quale la differenza tra la stima al passo $(a + 1)$ e quella al passo a è ragionevolmente piccola, fatto che giustifica l'interruzione dell'aggiornamento.

1.3.3 Algoritmo di Levenberg-Marquardt

Il metodo di Levenberg-Marquardt introduce una sostanziale modifica all'algoritmo di Gauss-Newton eliminando eventuali fonti di singolarità dovute

alla matrice $(F^{(a)'} F^{(a)})$ (se la matrice è singolare, non è invertibile e quindi la soluzione non può essere calcolata). Il nuovo passo di aggiornamento introduce una opportuna matrice diagonale di rango pieno

$$\delta^{(a)} = (F^{(a)'} F^{(a)} + \eta^{(a)} D^{(a)})^{-1} F^{(a)'} (y - f(\vartheta^{(a)})), \quad (1.22)$$

dove $D(a)$ è una matrice diagonale a rango pieno con elementi positivi e spesso, per semplificare i calcoli, $D(a) = I_p$. Il parametro $\eta^{(a)}$ viene modificato sulla base del valore della devianza $S(\vartheta)$. Se quest'ultima si riduce rispetto al passo precedente, al successivo verrà ridotto anche il valore di η , avvicinando il metodo a quello di Gauss-Newton (nel quale $\eta = 0$); se invece $S(\vartheta)$ aumenta, sarà incrementato anche il valore di η e ciò porta nella direzione del criterio della discesa massima.

1.3.4 Aspetti inferenziali e analisi dei residui

Come esposto in Guidolin e Guseo (2015), una metodologia inferenziale per la stima dei modelli precedentemente esposti può essere descritta tramite un modello di regressione non lineare (Seber e Wild, 1989) del tipo

$$\omega(t) = \eta(\beta, t) + \varepsilon(t), \quad (1.23)$$

dove $\omega(t)$ è la serie osservata, $\eta(\beta, t)$ è la componente deterministica che descrive funzioni istantanee o cumulate che dipendono dal parametro β e dal tempo t ed infine da $\varepsilon(t)$, la componente stocastica che esprime la parte residuale, a media 0 non necessariamente indipendente, identicamente e normalmente distribuita.

Come illustrato in Guidolin e Guseo (2015), nella struttura univariata che consideriamo, la variabile temporale o l'indice di riferimento dei dati informativi successivi, ha una forma particolare, definita da

$$t = 1, 2, \dots, c_2; c_2 + 1, \dots, n; c_2 + 1, c_2 + 2, \dots, n. \quad (1.24)$$

Definiamo con la funzione indicatrice $I_{1-G} = 1$ il primo prodotto entrante e con $I_G = 1$ il secondo. Il modello LVch può quindi essere riespresso in funzione di indicatori specifici che descrivono il primo e il secondo orizzonte

temporale del prodotto, vale a dire cioè che la componente deterministica è data da:

$$\eta(\beta, t) = \begin{cases} \left[p_{1a} + q_{1a} \frac{z_1(t)}{m_a} \right] [m_a - z_1(t)] I_{1-G} & t \leq c_2, \\ \left[p_{1a} + \frac{a_1 z_1(t) + \alpha_2 b_1 z_2(t)}{m_1 + \alpha_2 m_2} \right] [(m_1 - z_1(t)) + \alpha_2 (m_2 - z_2(t))] I_{1-G} & c_2 + 1 \leq t \leq n, \\ \left[p_{2a} + \frac{a_2 z_2(t) + \alpha_1 b_2 z_1(t)}{m_2 + \alpha_1 m_1} \right] [(m_2 - z_2(t)) + \alpha_1 (m_1 - z_1(t))] I_G & c_2 + 1 \leq t \leq n. \end{cases} \quad (1.25)$$

L'equazione 1.23 descrive un modello di regressione univariata generale. La stima dei suoi parametri può essere eseguita attraverso una procedura a due fasi; nella prima sfruttiamo le ben note e robuste funzionalità dei minimi quadrati non lineari (NLS) e selezioniamo il miglior modello non lineare per descrivere la traiettoria media della serie nella quale il metodo non parametrico evita ulteriori assunzioni distributive sul termine di errore e solitamente viene implementato attraverso la correzione di Levenberg-Marquardt. Nella seconda fase possiamo introdurre la previsione a lungo termine $\eta(\hat{\beta}, t)$ basata su una soluzione NLS di un processo ARMA con una covariata di controllo, in particolare un modello ARMAX, il cui scopo principale è quello di migliorare le previsioni a breve termine. Questa seconda parte è necessaria se un test (ad esempio un test Durbin-Watson o Portmanteau) diagnostica una significativa deviazione dei residui da un *White Noise*. Infatti, nel caso in cui ci sia stazionarietà debole dei residui può essere piuttosto comune osservare l'esistenza di gruppi contigui dotati del medesimo segno o, in termini grafici, la presenza di funzioni armoniche marcate intorno alla media nulla. Si tratta quindi di articolare meglio la rappresentazione formale di $\varepsilon(t)$. Il perfezionamento del modello ARMAX per fare previsioni a breve termine si basa su funzioni polinomiali di operatori ritardo con la seguente espressione:

$$\phi(B) \left[\omega(t) - c \eta(\hat{\beta}, t) \right] = \theta(B) a_t, \quad (1.26)$$

dove $\omega(t)$ è la serie osservata, $\eta(\hat{\beta}, t)$ è la serie prevista secondo il modello prescelto, a_t è un processo WN , B è l'operatore ritardo standard, $\phi(B)$ e $\theta(B)$ sono gli operatori ritardo di ordine p e q rispettivamente. Il parametro c è detto di calibrazione e consente di effettuare un test sull'adeguatezza del modello medio globale $\eta(\beta, t)$ basato sulla soluzione $\hat{\beta}$ del modello non lineare: il suo valore ottimale è 1 e gli usuali test statistici sono basati sulla distribuzione T di Student; in questo particolare caso il modello diventa:

$$\phi(B)\varepsilon(t) = \theta(B)a_t, \quad (1.27)$$

dal momento che la quantità $[\omega(t) - c\eta(\hat{\beta}, t)]$ non è altro che l'espressione dei residui.

Nel caso in cui nella serie sia presente una componente stagionale, si utilizza invece un modello SARMAX definito come:

$$\phi(B)\Phi(B^S)\left[\omega(t) - c\eta(\hat{\beta}, t)\right] = \theta(B)\Theta(B^S)a_t, \quad (1.28)$$

dove a_t è un processo WN , B , B^S sono gli operatori ritardo standard e stagionale rispettivamente e $\phi(B)$, $\Phi(B^S)$, $\theta(B)$ e $\Theta(B^S)$ sono gli operatori ritardo polinomiali di ordine p , P , q e Q rispettivamente. L'idea che sta alla base dei modelli SARMA è che il processo deve poter descrivere due tipi di relazione all'interno della serie osservata: la correlazione tra valori consecutivi, che è quella modellata dagli usuali processi ARMA, e la correlazione tra osservazioni che distano tra loro di un multiplo del periodo. Per valutare la presenza di una qualche forma di autocorrelazione tra i residui, e quindi per valutare la performance del modello, è possibile utilizzare il test di Durbin-Watson, che verifica l'ipotesi nulla di assenza di correlazione contro quella alternativa, che prevede l'esistenza di correlazione, positiva o negativa. La statistica test ha la forma seguente:

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}. \quad (1.29)$$

Il valore della statistica test è compreso tra 0 e 4; se assume un valore pari a 2, allora l'ipotesi di incorrelazione è verificata. Valori compresi tra 0 e 2 implicano invece una correlazione positiva tra i residui e, viceversa, valori tra 2 e 4 indicano una correlazione di segno negativo e quindi una certa distanza

tra un residuo e il successivo. La distribuzione di questa statistica non è nota, tuttavia gli stessi Durbin e Watson (1951) hanno calcolato dei valori critici che permettono di testare l'ipotesi nulla ed essi dipendono unicamente dal numero di regressori.

Un indicatore di performance usuale per questa classe di modelli è comunque l'indice R^2 .

Inoltre, allo scopo di valutare la performance di un modello esteso m_2 , confrontato con uno nidificato, m_1 , si può utilizzare il rapporto di correlazione multipla parziale al quadrato \tilde{R}^2 nell'intervallo $[0; 1]$ che ha la seguente espressione:

$$\tilde{R}^2 = (R_{m_2}^2 - R_{m_1}^2)/(1 - R_{m_1}^2), \quad (1.30)$$

dove $R_{m_i}^2$, $i = 1, 2$ sono gli indici di determinazione standard dei modelli m_i , $i = 1, 2$. L'indice \tilde{R}^2 ha una corrispondenza monotona con la cosiddetta *F-ratio* la cui espressione è:

$$F = [\tilde{R}^2(n - \nu)]/[(1 - \tilde{R}^2)\mu], \quad (1.31)$$

dove n è il numero di osservazioni, ν è il numero di parametri del modello esteso m_2 e μ è il numero incrementale di parametri da m_1 a m_2 .

Sotto forti condizioni sulla forma distributiva del termine di errore, in particolare l'indipendenza, la distribuzione e la normalità identiche, la statistica F per l'ipotesi nulla di equivalenza dei due modelli è una F di *Snedecor* centrale con gradi di libertà μ al numeratore e $n - \nu$ gradi di libertà per il denominatore $F \sim F_{\mu, n-\nu}$.

In casi più generali, il rapporto F ha un comportamento distributivo robusto e una soglia superiore uguale a 4, per $\mu = 1$ può essere un riferimento per testare l'equivalenza di due modelli non lineari annidati; si può usare un livello più basso circa uguale a 2 quando $\mu > 1$. Un modello più generale, m_2 , è statisticamente significativo rispetto a uno nidificato, m_1 , se il rapporto F è molto più alto di 4. Una sovrapparametrizzazione di un modello m_2 può essere riconosciuta sotto un alto valore dell'indice $R_{m_2}^2$ con instabilità elevate nei limiti asintotici del 95% basati su approssimazioni lineari. In queste situazioni una buona riduzione del modello implica una riduzione limitata dell'indice di determinazione $R_{m_1}^2$ rispetto a $R_{m_2}^2$ attraverso un rapporto F inferiore a 4.

Questa contrazione è fortemente supportata da una rilevante riduzione degli intervalli nei limiti asintotici del 95%.

1.4 Affinamento SARMAX e previsioni *out-of-sample*

I modelli non lineari utilizzati consentono di descrivere solo la traiettoria media delle serie; per poter risolvere l'autocorrelazione positiva dei residui si usa un affinamento SARMAX. Le previsioni *out-of-sample* vengono realizzate a partire da due step di calcolo:

1. la previsione della traiettoria media non lineare per ciascun concorrente,
2. la previsione delle serie temporali non lineari fuori dal campione per ciascun concorrente.

Step 1 per $z_2(t)$.

La previsione della traiettoria media cumulata dentro il campione e fuori dal campione per $z_2(t)$ è abbastanza semplice perché conosciamo la soluzione esatta della seconda equazione differenziale considerata, vale a dire, un modello di Bass,

$$W_2(t) - \varepsilon_2(t) = z_2(t) = f_2(\beta, t) = m_2 \frac{1 - e^{-(p_2+a_2)t}}{1 + (a_2/p_2)e^{-(p_2+a_2)t}} \quad (1.32)$$

dove $W_2(t)$ è il valore osservato e $\varepsilon_2(t)$ è il termine di errore residuo.

La stima della traiettoria media è quindi,

$$\hat{z}_2(t) = f_2(\hat{\beta}, t) \quad t = 1, 2, \dots, T, T + 1, \dots, T + K, \quad (1.33)$$

dove $\hat{\beta}$ è la soluzione dei minimi quadrati non lineari e $T + 1, \dots, T + K$ sono i tempi fuori dal campione.

Step 2 per $W_2(t)$.

Le previsioni in-sample e out-of-sample dei valori osservati cumulati possono essere calcolate attraverso la modellazione di un SARMAX (seasonal autoregressive moving average with exogenous input variables)

$${}_2\phi(B){}_2\Phi(B^S) \left(W_2(t) - c_2 f_2(\beta, t) \right) = {}_2\theta(B){}_2\Theta(B^S) a_t, \quad (1.34)$$

dove c_2 è un coefficiente reale $\simeq 1$ se $f_2(\beta, t)$ è la traiettoria media corretta, a_t è un processo WN , ${}_2B$, ${}_2B^S$ sono gli operatori ritardo standard e stagionale rispettivamente e ${}_2\phi(B)$, $\Phi(B^S)$, ${}_2\theta(B)_2$ e $\Theta(B^S)$ sono gli operatori ritardo polinomiali di ordine p , P , q e Q rispettivamente.

Le previsioni SARMAX, $\bar{z}_2(t)$, combinano la traiettoria media stimata $f_2(\hat{\beta}, t)$ e gli effetti indipendenti che includono componenti stagionali. I residui $W_2(t) - \bar{z}_2(t) = {}_2\hat{a}(t)$ definiscono la stima di un processo White Noise $(0, {}_2\hat{\sigma}^2)$.

Step 1 per $z_1(t)$.

La previsione della traiettoria media cumulata delle osservazioni out of sample dipende da entrambe le traiettorie $z_1(t)$ e $z_2(t)$. Seguendo l'approssimazione di Eulero $z_1'(t) \simeq z_1(t+1) - z_1(t)$, e notando che

$$c_1(t) = \frac{a_1 z_1(t) + b_1 z_2(t)}{m_1 + m_2} [(m_1 - z_1(t)) + (m_2 - z_2(t))] \quad (1.35)$$

otteniamo una previsione cumulata ricorsiva out-of-sample sfruttando le stime congiunte NLS per,

$\tilde{z}_1(t+1) = z_1(t) + c_1(t) \quad t = T, T+1, \dots, T+K-1$. La traiettoria media stimata in sample è funzione della soluzione NLS, $\hat{z}_1(t) = \sum_{i=1}^t \hat{z}_1'(i)$ per $t = 1, 2, \dots, T$. La traiettoria media quindi è data da:

$$\hat{z}_1(t) = \begin{cases} \hat{z}_1(t) & t = 1, 2, \dots, T, \\ \tilde{z}_1(t+1) = z_1(t) + c_1(t) & t = T, T+1, \dots, T+K. \end{cases} \quad (1.36)$$

Step 2 per $W_1(t)$.

Le previsioni in-sample e out-of-sample dei valori osservati cumulati possono essere calcolate attraverso la modellazione di un SARMAX

$${}_1\phi(B)_1\Phi(B^S) \left(W_1(t) - c_1 f_1(\beta, t) \right) = {}_1\theta(B)_1\Theta(B^S) a_t. \quad (1.37)$$

Le previsioni SARMAX, $\bar{z}_1(t)$, combinano la traiettoria media stimata $f_1(\hat{\beta}, t)$ e gli effetti indipendenti che includono componenti stagionali.

I residui $W_1(t) - \bar{z}_1(t) = {}_1\hat{a}(t)$ definiscono la stima di un processo White Noise $(0, {}_1\hat{\sigma}^2)$.

1.5 Ambiti di applicazione dei modelli di Lotka-Volterra

I possibili ambiti di applicazione dei modelli di Lotka-Volterra sono molto eterogenei in quanto possono trattare prodotti di vendita molto diversi: prodotti finanziari, prodotti farmaceutici, prodotti dolciari, prodotti tecnologici e automobilistici. Nell'ambito finanziario, in Lee, Lee e Oh (2005) si mostra come attraverso il modello di Lotka-Volterra si tenti di analizzare la relazione dinamica tra i titoli coreani KSE e KOSDAQ in un'ottica di previsione tecnologica della concorrenza. Il modello è adottato per rappresentare la situazione competitiva del mercato azionario coreano e viene stimato utilizzando i dati giornalieri dell'indice empirico di KSE e KOSDAQ nel periodo 1997 – 2001. I risultati mostrano che esistono relazioni predatore-preda tra due mercati in cui KSE ha agito come una preda subito dopo l'emergere di KOSDAQ.

In Guidolin, Guseo e Mortarino (2019), invece, si è effettuata un'analisi congiunta delle vendite regolari (a prezzo pieno) e promozionali (a prezzo scontato) di un prodotto dolciario e, sulla base dell'ipotesi che i due processi di vendita possano influenzarsi a vicenda, si è sviluppato un approccio basato su un modello di Lotka-Volterra modificato, che cattura gli effetti della competizione. Vengono utilizzate serie temporali settimanali, che si riferiscono separatamente alle vendite regolari e promozionali. I risultati mostrano che la concorrenza esiste realmente ed ha un carattere simmetrico: le vendite regolari possono accedere al mercato residuo di quelli in promozione, indicando l'effetto benefico degli sforzi promozionali; tuttavia, l'effetto opposto è anche significativo.

Un altro campo applicativo molto interessante del modello di Lotka-Volterra è rappresentato dall'ambito farmaceutico. In Dalla Valle (2014), si propone l'applicazione del modello LVch ad un caso reale. Si studia il comportamento delle vendite di cimetidina e ranitidina e si definisce come i modelli di Lotka-Volterra consentano una definizione del mercato residuo di una categoria di prodotto più generale rispetto ad approcci alternativi, superando la pesante limitazione della sincronicità tra i due prodotti.

Altro ambiente a cui viene applicato il modello di Lotka-Volterra riguarda la competizione tra due formati blockbuster nell'industria musicale, l'audio-cassetta e il compact disc (Guidolin e Guseo (2015)). In particolare, si è

analizzata l'evoluzione di queste tecnologie nel mercato statunitense della musica preregistrata, per la quale sono disponibili dati di vendita annuali dal 1973 al 2012; si scopre che esiste un singolo prodotto, l'album musicale, che viene commercializzato in due formati diversi, in modo che la concorrenza si manifesti tra i formati e non tra due prodotti nella stessa categoria commerciale.

L'oggetto dello studio a cui si applicheranno i modelli illustrati nel paragrafo 1.2.3, appartiene, nel nostro caso, al settore dei trasporti privati, in particolare quello delle auto elettriche che rientra nella definizione di innovazione descritta precedentemente e per il quale, stando alla letteratura esistente, non è ancora stata applicata la classe dei modelli di Lotka-Volterra. Per capire come i mercati si stiano muovendo nell'espansione di questa nuova tecnologia e per poter in tal senso interpretare in modo obiettivo i risultati dei modelli statistici che si andranno ad utilizzare, è senza dubbio necessario comprendere dapprima le dinamiche del contesto in questione. Tenendo bene a mente quest'obiettivo, si cercherà di fornire nel capitolo 2 una panoramica sulla situazione climatica attuale del nostro pianeta e come gli Stati Uniti d'America si pongano in quest'ottica analizzando in modo particolare il settore dei trasporti privati delle auto elettriche. Si procederà ad un confronto con la corrispondente situazione a livello italiano, evidenziando limiti e aspetti positivi.

Prima però si fornisce nel paragrafo 1.6 un excursus della letteratura sviluppata sui modelli di diffusione applicati ad automobili elettriche.

1.6 Letteratura sui modelli di diffusione applicati a veicoli elettrici

Nel modellare il mercato automobilistico, attraverso la previsione del tempo di adozione e del tasso di nuovi veicoli, è stato utilizzato il modello di Bass per la facile implementazione e la possibilità di adattarsi alla tendenza storica della tecnologia del veicolo. Per i veicoli in cui i dati di vendita esistono già, i parametri del modello di Bass possono essere stimati (Al-Alawi e Bradley (2013)). Per i veicoli in cui non sono disponibili dati storici sulle vendite, è

necessario utilizzare analoghi o indagini per determinare le caratteristiche di adozione dei prodotti del consumatore. Queste ipotesi causano un maggiore grado di incertezza e richiedono una calibrazione del modello più ampia e/o l'inclusione di più variabili come gli effetti sui prezzi e sulla pubblicità.

Stimare il mercato potenziale è una parte fondamentale della formulazione di un modello di diffusione, ma stimarlo per ogni classe di veicoli si è mostrato essere un fattore di “complicazione” in questo tipo di approccio alla modellazione della tecnologia automobilistica. Il mercato potenziale deve cambiare spesso nel periodo dell'analisi integrando l'espansione del numero di veicoli considerati, il cambio di volume della classe del veicolo e le prestazioni del costruttore. (Al-Alawi e Bradley (2013)).

Poiché il settore dei trasporti richiede una riduzione delle emissioni di CO_2 , l'industria automobilistica, i ricercatori e i responsabili politici sono portati a ricercare un modo efficace per la diffusione di veicoli elettrici. A tale scopo, è stata creata una varietà di modelli che permette di analizzare i fattori che influenzano la diffusione di questi veicoli nel mercato e di studiare a propria volta i modi per accelerarne la diffusione, con sussidi o restrizioni (Gnann, Stephens e Lin (2018)). Nello studio di Gnann, Stephens e Lin (2018) questi modelli che differiscono notevolmente in struttura, logiche interne e fattori di input, vengono confrontati per rispondere alle seguenti domande:

- quali modelli sono usati per la diffusione nel mercato dei PEVs (cfr. Box 1)?
- quali fattori e che dati vengono usati?
- quali sono i fattori più influenti per la diffusione nel mercato?
- si ottengono risultati generali dal confronto di questi modelli?

A seconda del paese che si considera, i fattori “importanti” per il processo di diffusione cambiano; per esempio negli Stati Uniti d'America si dà maggior peso ai prezzi d'acquisto e alle caratteristiche dei veicoli, mentre in Germania ai prezzi dell'energia. Solo i risultati di alcuni modelli possono essere confrontati, ad esempio tra PHEV e BEV. Anche se le quote di mercato non possono essere previste in modo esatto, i modelli aiutano a comprendere cosa

influenza la diffusione nel mercato. I fattori che devono essere tenuti in considerazione in questi tipi di modelli sono: il tempo limitato di durata delle batterie, la presenza o meno di infrastrutture di ricarica, il miglioramento tecnologico e dei costi delle batterie nel tempo.

Al secondo posto per vendite di veicoli elettrici si trova la Cina. Al fine di migliorare la capacità del servizio di ricarica per i veicoli, studiosi cinesi hanno sviluppato il modello di diffusione generalizzato di Bass (che consente di utilizzare variabili esterne oltre a quelle del modello di Bass standard) utilizzando il volume delle vendite di veicoli elettrici cinesi e il numero di stazioni di ricarica dal 2010 al 2016 per esplorare l'interazione tra le vendite di veicoli elettrici e le stazioni di ricarica (Yushan, Gangyi e Lefei (2017)). Sulla base del modello di diffusione, il principale contributo della ricerca si trova nel fatto che un livello di costruzione più elevato delle stazioni di ricarica può promuovere la diffusione sul mercato dei veicoli elettrici nelle fasi di sviluppo iniziali e successive andando poi a scemare. Ciò può quindi indurre i governi locali ad investire nel miglioramento del livello del servizio di ricarica o ad adottare altre misure per stabilizzarne la crescita del mercato. Inoltre, la previsione del volume delle vendite utilizzando tale modello di diffusione può guidare governo e imprese a svolgere una pianificazione ragionevole a breve e lungo termine in modo efficiente e preciso.

Tra gli altri studi importanti in materia si ricordano:

- Cao e Mokhtarian (2014) che utilizza una estensione del modello di Bass con mercato potenziale variabile per modellare la diffusione di veicoli ibridi. Per poter rendere la sua analisi efficace, introduce anche un fattore importante: il prezzo della benzina tra il 2003 e il 2025 oltre alla previsione dell'evoluzione della consapevolezza della tecnologia da parte dei consumatori. Ciò che emerge da questo studio, le cui assunzioni sono la costanza dei coefficienti nel modello di Bass e la non interazione tra le tecnologie dei veicoli, è una previsione pressochè accurata.
- Al-Alawi e Bradley (2013) nel quale si descrivono tre metodi per la previsione del mercato di HEVs, PHEVs e EVs. Nel primo caso propongono l'uso degli ABM (*Agent-based modeling*), i quali si basano sull'idea che alcuni tipi di sistemi possano essere modellati rappresentando le singole

entità che li compongono e attribuendo a queste, o a una parte di esse, un insieme di caratteristiche peculiari. Queste entità sono appunto dette agenti. Ogni agente viene fornito con caratteristiche interne che dettano le loro interazioni tra gli altri agenti nell'ambiente. La domanda di veicoli è rappresentata da agenti di consumo le cui caratteristiche corrispondono a sesso, età, reddito, stile di vita, esigenze quotidiane di guida, budget di trasporto, periodo di proprietà e preferenze per la classe del veicolo, tipo di carburante ecc..

I vantaggi dell'utilizzo di ABM sono da ritrovarsi nell'utilizzo di caratteristiche individuali, bisogni, limiti e preferenze degli agenti quando si simula il loro comportamento e tra le interazioni nell'ambiente di modellazione. In generale, ciò consente di sviluppare modelli sulla preferenza del consumatore, sulla base della modellazione del comportamento del consumatore sia su dati reali che ipotetici. Modellando le decisioni di acquisto dei veicoli a livello individuale, l'approccio ABM consente di prendere in considerazione le complessità del mercato, come ad esempio, il cambio di modalità di trasporto, il ruolo dei social network e un budget limitato per il trasporto personale. Tra gli svantaggi degli studi ABM si annovera la loro complessità. I modelli ABM sono generalmente più difficili da verificare e validare e i dati e le elasticità a livello di agente possono avere grandi effetti sui risultati complessivi della modellazione se le loro sensibilità non vengono valutate. Ad oggi, la modellazione ABM è stata convalidata eseguendo analisi della sensibilità a scenari di condizioni di mercato piuttosto che analisi della sensibilità a metodi e dati di modellazione.

Nel secondo caso si menzionano modelli di scelta del consumatore; vengono sviluppati modelli di scelta discreti e logit (modello logit multinomiale e modello logit annidato). I modelli funzionano stimando il tasso di penetrazione del mercato delle nuove tecnologie dei veicoli, utilizzando le relazioni derivate tra le preferenze dei consumatori e le caratteristiche di un insieme di veicoli. I vantaggi della modellizzazione della scelta del consumatore si hanno quando si dispone di un ricco dataset sulle preferenze dei consumatori per prevedere in modo efficiente le future preferenze. I modelli di scelta del consumatore presenti

in letteratura, sono meno complessi dei modelli ABM a causa della loro capacità di modellare il processo decisionale dei consumatori come gruppo piuttosto che come individui. Gli svantaggi di questo tipo di modellazione si ritrovano nella mancanza di dati di vendita storici per gli acquirenti di molti P/H/EV. Per queste tecnologie e mercati in via di sviluppo, la sensibilità delle decisioni di acquisto dei consumatori agli attributi di P/H/EV deve essere derivata indirettamente da ipotesi, dati di indagine o altri campi di ricerca sulle preferenze dei consumatori. Nel terzo caso vengono descritti i modelli di diffusione e le serie temporali, i quali cercano di catturare il ciclo di vita di nuovi prodotti nel tempo. I modelli di diffusione e le serie temporali sono un mezzo per descrivere il processo di accettazione sul mercato di un prodotto nel tempo. Simulano l'adozione da parte dei consumatori di un prodotto utilizzando una varietà di teorie sulla diffusione generale del mercato e generalmente incorporano il concetto di generazioni di prodotti e un potenziale di mercato assoluto. I vantaggi di questi modelli (è stato utilizzato un modello di Bass) sono la facilità nell'essere implementati e l'adattarsi alla tendenza storica della tecnologia del veicolo o di tecnologie simili. Gli svantaggi si ritrovano nella non conoscenza a priori del tempo di raggiungimento del picco di vendite e nella loro inadeguatezza per simulare la diffusione di un prodotto dove esiste un prodotto concorrente; il potenziale di mercato per ogni veicolo deve essere stimato al di fuori del modello.

Box 1: legenda acronimi utilizzati

Nome	Definizione
BEV	Battery Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
PEV	Plug-in Electric Vehicle
OLEV	On-Line Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ZEV	Zero Emission Vehicle
ABM	Agent Based Modeling
EVI	Electric Vehicle Initiative
EPA	Environmental Protection Agency
OEM	Original Equipment Manufacturer
HOV	High Occupancy Vehicle lane

Capitolo 2

Gli USA e i trasporti: impatto ambientale e soluzioni

In questo elaborato si è scelto di studiare il fenomeno di diffusione delle auto elettriche secondo una logica competitiva. L'ambito di applicazione è il mercato statunitense che rappresenta uno dei mercati maggiormente sviluppati in questo senso, specialmente per la presenza di Tesla, azienda leader nel settore. Il fatto di considerare il caso statunitense può apparire forse sorprendente ma si avrà modo di chiarire che accanto alle posizioni conservatrici e protezionistiche dell'amministrazione Trump, vi sono delle realtà in continua espansione ed evoluzione come ad esempio la cosiddetta Silicon Valley, primo esempio di parco scientifico a livello mondiale che si pone come uno tra i più importanti poli di investimento tecnologico al mondo, di certo il più celebre per i grandi nomi di industrie che qui sono nate e hanno fatto la loro fortuna segnando l'era dello sviluppo digitale. Tra le più annoverate, dopo Amazon, Apple e Microsoft, c'è di sicuro Tesla Motors, un'azienda specializzata nella produzione di veicoli elettrici, pannelli fotovoltaici e sistemi di stoccaggio energetico. Nell'ottica di approfondire l'analisi della diffusione del mercato innovativo che questa azienda ha certamente accresciuto a livello mondiale, si pone in prima analisi, una panoramica sulle politiche ambientali che il governo americano attua in materia di salvaguardia dell'ambiente e di incentivi all'utilizzo di fonti di energia rinnovabili per poi studiare nello specifico il mercato delle auto elettriche. Questo capitolo è quindi dedicato alla descri-

zione delle politiche ambientali che gli Stati Uniti d'America hanno messo in atto a seguito dell'elevato impatto ambientale che i trasporti pubblici e privati hanno comportato con l'obiettivo di capire il contesto entro il quale grandi aziende come Tesla siano riuscite ad espandere il proprio mercato e ad accrescere di conseguenza gli orizzonti dell'energia pulita.

2.1 Impatto ambientale del trasporto statunitense

Quello delle emissioni di CO_2 , e in generale dell'inquinamento atmosferico, è un problema che riguarda tutto il mondo e che cresce di anno in anno. Stando all'ultimo rapporto dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, tre milioni di persone muoiono ogni anno per l'esposizione all'inquinamento dell'aria del luogo in cui vivono. Solo l'8% della popolazione mondiale ha il privilegio di respirare "aria buona", mentre il restante 92% vive in zone dove l'inquinamento atmosferico supera il limite massimo fissato dall'OMS. Nonostante ogni Paese contribuisca in misura diversa all'innalzamento dei livelli di anidride carbonica su scala globale, il Global Carbon Atlas¹ ha stilato una classifica degli Stati più inquinanti. In base a questa classifica il paese che inquina di più in assoluto è la Cina che si attesta a 9.84 miliardi di tonnellate di CO_2 nel 2017. In seconda posizione troviamo gli Stati Uniti con 5.3 miliardi di tonnellate di CO_2 , mentre al terzo posto c'è l'India (2.4 miliardi di tonnellate di CO_2). Come riporta Rhodium², uno dei principali gruppi di ricerca indipendenti americani, le emissioni di gas serra negli USA sono causate in maniera preponderante, per il terzo anno consecutivo, dal settore dei trasporti, che ha eclissato per la prima volta dagli anni '70 le emissioni derivanti dalla produzione di elettricità come fonte principale di CO_2 , a causa di un calo dei prezzi del gas (Figura 2.1).

Secondo il gruppo di ricerca, le emissioni di gas serra legate all'energia negli Stati Uniti sono aumentate nel 2018 del 3.4%, invertendo il calo degli ultimi tre anni. Il settore dei trasporti contiene al suo interno anche camion e autobus che trasportano merci dai produttori ai negozi, raccolgono i rifiuti, consegnano pacchi e trasportano migliaia di persone ogni giorno. Ovviamente

¹www.globalcarbonatlas.org.

²www.rhg.com.

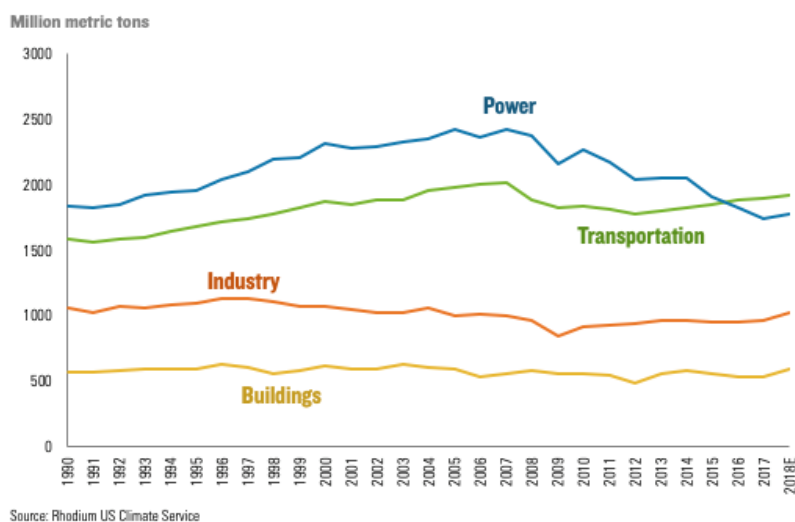


Figura 2.1: Emissioni di CO_2 per settore

anche questi veicoli influenzano notevolmente la salute pubblica e il riscaldamento globale. I veicoli pesanti rappresentano solo il 5% circa di tutti i veicoli sulla strada, ma generano oltre il 25% delle emissioni che causano il riscaldamento globale e l'inquinamento atmosferico. La sfida di ridurre le emissioni di questo settore è quindi in pieno svolgimento. Se ci limitiamo ad analizzare il trasporto privato degli americani, è noto che le auto più comprate sono SUV e pickup che concorrono ampiamente anch'essi all'inquinamento atmosferico. Quindi la scelta di acquistare un veicolo più ecocompatibile ed a basse emissioni, consente ai cittadini americani di ridurre la propria impronta di carbonio e di contribuire così alla riduzione delle emissioni totali di gas serra degli USA. Il futuro automobilistico degli USA e di molti stati appartenenti all'Unione Europea è, di certo, il mercato elettrico che sta ormai creando auto più affidabili e ad un prezzo più accessibile economicamente. Il prezzo delle batterie, che rappresenta il motivo principale dell'elevato costo delle auto elettriche, è sceso nell'ultimo anno di circa l'8% ed inoltre, viaggiare su distanze più lunghe con i veicoli elettrici sta diventando più facile, dal momento che il numero di stazioni di ricarica disponibili al pubblico è triplicato dal 2012, con 35.000 in essere fino al 2018. Un recente rapporto del Climate Center, il Climate Friendly Cars, mostra quali siano le auto più "rispettose" del clima in ogni stato federale americano. Il rapporto utilizza

un sistema di classificazione a cinque foglie per confrontare gli impatti delle emissioni dei veicoli, dove il simbolo di cinque foglie corrisponde ad un'auto che produce pochissime emissioni. Vi sono quindi 38 stati che hanno almeno 10 auto con una valutazione di quattro foglie o superiore (Figura 2.2). Ciò significa che percorrendo 100.000 miglia di guida, queste auto producono meno di 31.7 tonnellate di CO_2 ; e vi sono anche 12 stati con almeno una macchina che raggiunge un punteggio di cinque foglie, nel senso che quelle vetture producono meno di 18.4 tonnellate di CO_2 su 100.000 miglia di guida.

Climate-Friendly Options Are Available in Every State

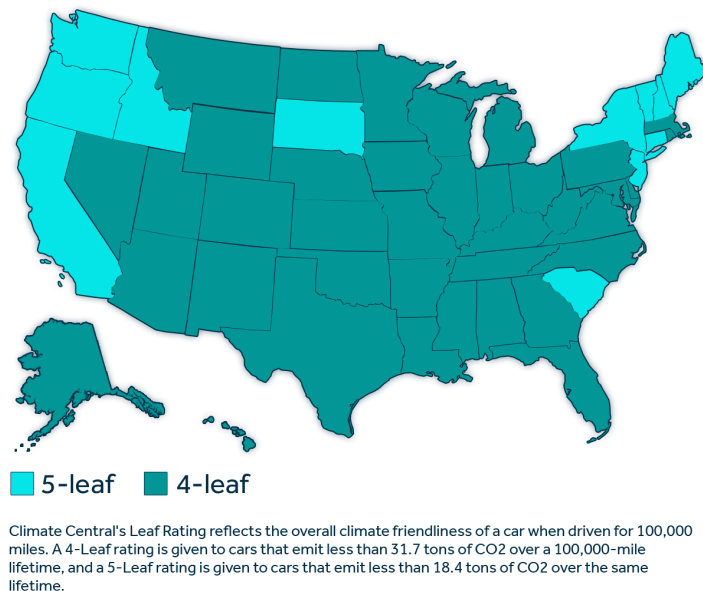


Figura 2.2: Mappa degli USA indicante gli stati federali che offrono la vendita di auto elettriche a basso impatto ambientale

2.2 Politiche “green” degli USA

Uno dei primi atti di Donald Trump, pochi mesi dopo le elezioni, fu quello di recedere dagli accordi sul clima di Parigi (cfr. Box 2): una scelta pesantemente contraria all'intera comunità scientifica mondiale, in grado di pregiudicare i già negativi risultati che dovrebbero portare al taglio nel 2025 delle emissioni di CO_2 nell'atmosfera. Gli obiettivi del presidente USA erano

di permettere alle industrie americane di continuare ad usare combustibili fossili (petrolio e carbone) con conseguenze potenzialmente devastanti per l'aumento delle emissioni di gas serra nell'aria. Ma contrariamente a questa direzione, numerosi Stati americani, città, aziende e università statunitensi si sono riunite per riaffermare il proprio impegno ad aiutare l'America a raggiungere gli obiettivi climatici di Parigi dando vita al progetto *America's Pledge*, la cui iniziativa lanciata nel Luglio 2017 dall'ex sindaco di New York Michael Bloomberg e dal governatore della California Jerry Brown, mira ad abbattere le loro emissioni di gas serra rispettando gli obiettivi dell'accordo di Parigi. Il progetto ricorda come al giorno d'oggi gli Stati Uniti siano a metà strada rispetto all'obiettivo di ridurre entro il 2025 l'emissione di CO_2 del 26-28% rispetto ai valori del 2005. Tra il 2005 e il 2016 le emissioni di CO_2 nell'aria sono scese solo del 12% (la metà rispetto alle aspettative per il 2025), ma nel 2017, nonostante la nuova spinta della Casa Bianca all'uso del combustibile fossile, gli Stati Uniti hanno registrato la più bassa emissione di gas serra degli ultimi 25 anni; si ha quindi un chiaro segno sul come, a prescindere da politiche errate a livello nazionale, le azioni dal basso possano mirare a raggiungere obiettivi superiori a quelli previsti dagli accordi sul clima di Parigi.

Le linee guida tracciate dal progetto *America's Pledge* sono quindi molto chiare: accelerare la chiusura degli impianti a carbone, incoraggiare i residenti a ristrutturare le proprie abitazioni per migliorarne l'efficienza energetica, sviluppare politiche regionali per abbattere l'uso del carbone nelle aree di lavoro e soprattutto, aumentare l'adozione di veicoli elettrici.

Box 2: Cenni storici sugli accordi internazionali per la salvaguardia del clima

La Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) è il principale trattato ambientale internazionale ed è stata sottoscritta al Summit della Terra, tenutosi a Rio de Janeiro nel 1992. Lo scopo dell'accordo era quello di ridurre le emissioni di gas serra sulla base del riscaldamento globale non ponendo però legalmente, vincoli ai paesi sottoscriventi. Ratificata da 195 paesi ha rappresentato uno strumento che consentiva alle Nazioni di cooperare al raggiungimento dello scopo finale. Ci sono due questioni collegate all'UNFCCC:

- *la ratifica dell'emendamento di Doha al protocollo di Kyoto, che riguarda gli impegni relativi al secondo periodo dal 2013 al 2020,*
- *la ratifica dell'accordo di Parigi, un nuovo accordo globale sui cambiamenti climatici esteso a tutti i paesi dell'UNFCCC, la cui attuazione ed entrata in vigore avverrà nel 2020.*

Protocollo di Kyoto

A metà degli anni Novanta, i firmatari dell'UNFCCC hanno compreso che, per ridurre le emissioni di CO₂, erano necessarie disposizioni più severe di quanto stabilito in precedenza. Nel 1997 hanno approvato il protocollo di Kyoto, che ha introdotto come obiettivo la riduzione delle emissioni giuridicamente vincolanti per i paesi sviluppati. In seguito sono stati apportati degli emendamenti in occasione della conferenza ONU sui cambiamenti climatici tenutasi a Doha (Qatar) nel Dicembre 2012 che hanno formalmente istituito il secondo periodo di impegno per la lotta alle emissioni di gas serra. I paesi partecipanti si sono impegnati a ridurre le emissioni almeno del 18% rispetto ai livelli del 1990, ma la principale lacuna del protocollo di Kyoto è che richiede unicamente ai paesi sviluppati di intervenire. Inoltre, considerando che gli Stati Uniti non hanno mai aderito al protocollo, che il Canada si è ritirato prima

della fine del primo periodo di adempimento e che Russia, Giappone e Nuova Zelanda non prendono parte al secondo periodo che avrà termine nel 2020, tale strumento si applica attualmente solo a circa il 14% delle emissioni mondiali. Oltre 70 paesi in via di sviluppo e sviluppati hanno tuttavia assunto vari impegni non vincolanti intesi a ridurre o limitare le rispettive emissioni di gas a effetto serra.

Ratifica dell'emendamento di Doha: l'accordo di Parigi

La conferenza di Parigi sul clima tenutasi dal 30 Novembre all'11 Dicembre 2015 ha permesso alle parti di raggiungere un nuovo accordo globale su come ridurre e contrastare i cambiamenti climatici. Si tratta di un risultato equilibrato con un piano d'azione per limitare il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2 gradi. Questo accordo è entrato in vigore il 4 Novembre 2016, in seguito all'adempimento delle condizioni per la ratifica da parte di 55 paesi che rappresentano circa il 55% delle emissioni globali di gas a effetto serra. I paesi aderenti sono 195 compresi tutti gli stati membri dell'Unione Europea e vede come nuovo firmatario la Siria e come “grande assente” gli USA (cfr. paragrafo 2.2). I principali elementi del nuovo accordo di Parigi sono:

- *contributi: prima e durante la conferenza di Parigi i paesi hanno presentato piani d'azione nazionali globali in materia di clima finalizzati a ridurre le rispettive emissioni,*
- *ambizione: i governi hanno deciso di comunicare ogni cinque anni i propri contributi per fissare obiettivi più ambiziosi,*
- *trasparenza: hanno accettato inoltre di comunicare - l'un l'altro e al pubblico - i risultati raggiunti nell'attuazione dei rispettivi obiettivi al fine di garantire trasparenza e controllo,*
- *solidarietà: l'UE e gli altri paesi sviluppati continueranno a fornire finanziamenti per il clima ai paesi in via di sviluppo per aiutarli sia a ridurre le emissioni che a diventare più resilienti agli effetti dei cambiamenti climatici.*

2.3 Adozione dei veicoli elettrici in USA: stato del mercato, incentivi, modelli tecnologici

Nella seguente sezione si presterà attenzione a tre fattori chiave per definire il processo di adozione dei veicoli elettrici: situazione del mercato attuale, forme di incentivazione e tecnologie attualmente disponibili. La discussione di tali aspetti risulta essenziale ad inquadrare il contesto di riferimento per le successive analisi.

2.3.1 Vendite di veicoli elettrici a livello mondiale e negli USA

Come riportano Cazzola, Turk e Bunsen (2018) la vendita di auto elettriche nel mondo ha superato il volume record di un milione di unità nel 2017. Come si vede dalla figura 2.3 a livello mondiale è la Cina che, con un aumento di vendita del 72% rispetto l'anno precedente, detiene il più alto volume di vendite ed è seguita dagli Stati Uniti; la Norvegia invece è il leader mondiale in termini di quote di mercato con il 39% delle vendite di nuove auto elettriche, un valore sei volte superiore alla Svezia, che ha il terzo posto per quota di mercato globale (6%). Nel 2016 il tasso di crescita delle vendite è diminuito rispetto al 2015, ma le vendite sono aumentate nel 2017, registrando un aumento annuo del 54% (rispetto al 38% del 2016). La crescita più forte delle vendite nel 2017 si è registrata in Germania e Giappone, dove le vendite si sono più che raddoppiate rispetto ai livelli di vendita del 2016. Due terzi delle vendite di auto elettriche nel 2017 sono state di tipo BEV, anche se la quota di PHEV nelle vendite di auto elettriche è aumentata nella maggior parte dei paesi EVI negli ultimi anni ³. Nonostante i Paesi Bassi abbiano la seconda quota azionaria mondiale di auto elettriche, essi rappresentano il solo paese membro di EVI in cui il volume delle vendite e la quota di mercato annuali sono diminuiti dal 2013 al 2017; ciò riflette un cambiamento nel sistema di tassazione del paese relativo all'uso privato di auto aziendali,

³Nel Cazzola, Gorner e Scheffer, 2018 una tendenza simile è stata osservata nel mercato delle auto elettriche nordiche, e si è riscontrato che questa tendenza può essere collegata a strutture di incentivi che favoriscono PHEV e all'introduzione di una più ampia varietà di modelli PHEV specialmente negli ultimi anni.

che ha chiuso un incentivo fiscale per PHEV all'inizio del 2017, mantenendo un vantaggio fiscale per gli BEV ⁴.

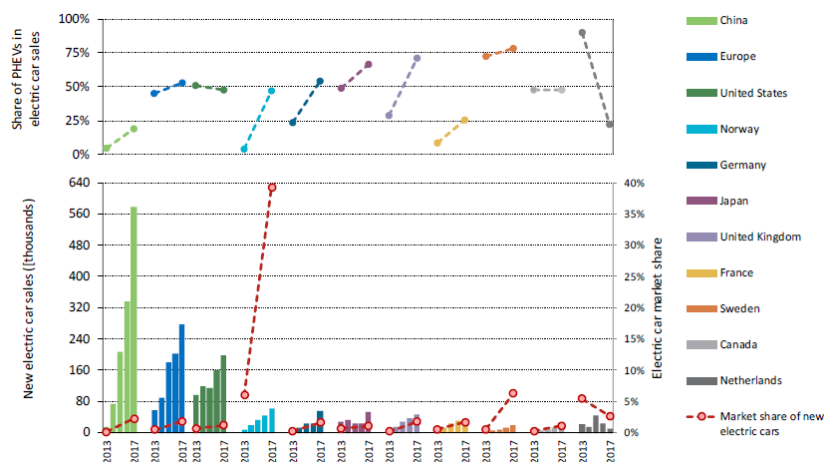


Figura 2.3: Vendite di auto elettriche e quota di mercato nei primi dieci paesi dell'EVI e in Europa, 2013-2017

Per quanto riguarda gli USA, nell'Aprile 2018, l'Agenzia per la protezione dell'ambiente degli Stati Uniti (EPA), dopo aver visionato i dati relativi alle emissioni di gas serra e avendo ritenuto che gli standard in merito fossero troppo rigidi, ha annunciato un cambiamento delle norme sulle emissioni di gas serra per i nuovi veicoli commerciali leggeri che verranno venduti negli Stati Uniti tra il 2022 e il 2025, decisione che probabilmente ridurrà l'adozione di auto elettriche a livello nazionale. Lo stato della California, da sempre pioniere nel campo dell'energia rinnovabile, respinge l'attuazione degli standard federali: il programma di veicoli a zero emissioni della California (ZEV)⁵

⁴Questo cambiamento di politica è in linea con la strategia dell'Olanda di eliminare gradualmente le vendite di PHEV e promuovere le vendite di BEV per facilitare il passaggio a trasporti a emissioni zero che è necessario per raggiungere le ambizioni nazionali di riduzione dei gas serra e le sue ambizioni negli impegni climatici presi all'accordo di Parigi. Le maggiori quote di mercato dei PHEV negli anni precedenti sono state determinanti per dare il via alla transizione verso le auto elettriche nei Paesi Bassi e hanno guidato lo sviluppo della sua rete EVSE.

⁵Si noti che nel programma ZEV della California, ZEV si riferisce a veicoli che producono emissioni allo scarico pari a zero in qualsiasi modalità operativa o condizione. Tuttavia, lo standard che consente anche ai veicoli ibridi di generare crediti ZEV

è una politica che continuerà a garantire il supporto per il lancio di veicoli elettrici negli Stati Uniti. Il programma infatti assegna ad ogni OEM (*Original. Equipment. Manufacturer*), “crediti ZEV”, in modo che gli OEM siano tenuti a soddisfare una determinata percentuale di vendite ZEV tramite vendite dirette ZEV o attraverso l’acquisto di crediti negoziabili.

Per quanto riguarda invece i brand delle auto elettriche vendute in USA si nota che (Figura 2.4) Tesla si conferma essere il più grande singolo contributore alla crescita di veicoli elettrici negli Stati Uniti (cfr. paragrafo 2.3.3). Esso rappresenta infatti la metà del volume plug-in degli Stati Uniti e, contando solo i BEV, 3 su 4 provengono da Tesla; al contrario, gli sviluppi del 2018 di Ford ed FCA sono meno impressionanti. Inoltre, Nissan che ha avuto vendite molto più elevate durante la sua prima generazione deve ancora riprendersi dal cosiddetto “Rapidgate”⁶, fenomeno che potrebbe aver influenzato i consumatori nella scelta dell’acquisto.

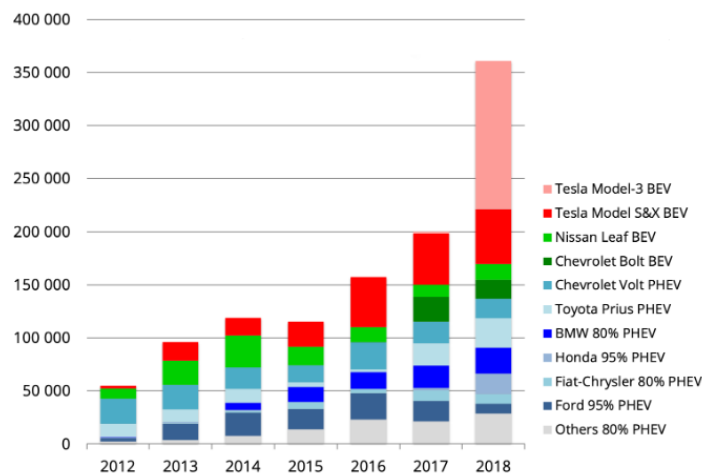


Figura 2.4: Vendite plug-in per casa automobilistica/modello

⁶*Rapidgate*: termine con il quale si identifica il fatto che la batteria dell’automobile dopo aver raggiunto una certa temperatura, carichi una potenza considerevolmente inferiore rispetto a quando la batteria è in condizioni normali.

2.3.2 Incentivi all'adozione delle auto elettriche: un confronto tra USA e Italia

USA

Il grande successo delle vendite delle auto elettriche negli Stati Uniti è dovuto senz'altro al sistema di incentivi che gli stati federali mettono a disposizione della cittadinanza. Come si vede dalla figura 2.5, le aree con più incentivi corrispondono agli stati in cui le vendite sono maggiori. Il mercato dei veicoli elettrici e dei veicoli elettrici plug-in per stato negli Stati Uniti conferma la correlazione tra un aumento degli incentivi e un aumento delle vendite. Ciò avviene anche in Europa, dove la Norvegia è leader del mercato, grazie al suo forte programma di incentivi.

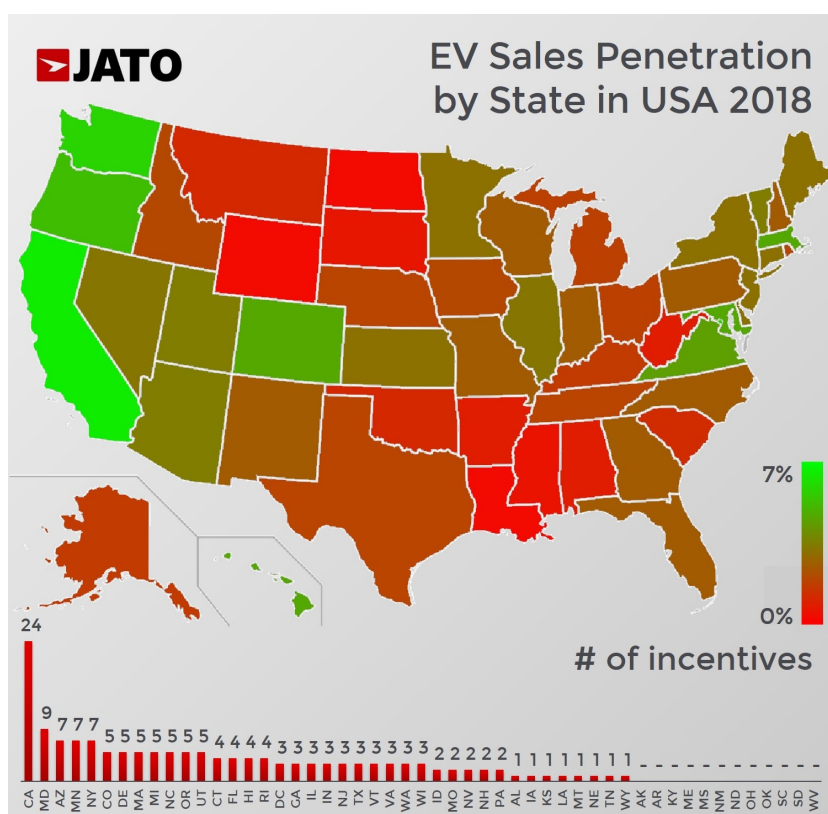


Figura 2.5: Mappa degli USA indicante gli stati federali che offrono la vendita di auto elettriche in relazione agli incentivi

L'attuale struttura dei crediti d'imposta e degli altri incentivi negli Stati Uniti non è solo diseguale tra gli Stati, ma mostra anche dove la domanda cresce al ritmo più rapido. Quindi in sostanza si evince che l'elettrificazione non è una priorità per tutti i 50 stati degli Stati Uniti. Ci sono grandi differenze in termini di volume delle vendite, penetrazione del mercato e numero di incentivi.

In questo contesto è la California a fare da apripista in quanto a investimenti per l'elettrificazione. Nel 2003 infatti Elon Musk e J.B. Straubel fondano la Tesla motors con l'idea di progettare una vettura totalmente elettrica, a emissioni zero. L'azienda prende il suo nome da quello di Nikola Tesla, uno dei più noti e avveniristici ingegneri elettrici naturalizzato statunitense dei primi anni del Novecento, ed utilizza per la costruzione di queste macchine elettriche due motori ispirandosi proprio alle turbine di Tesla. La prima vettura prodotta dalla casa statunitense è una roadster, pensata per impressionare il pubblico di tutto il mondo con le prestazioni brillanti di una macchina elettrica e prodotta in pochi esemplari. Nel 2012, grazie ai fondi stanziati e foraggiati dai nuovi finanziatori, provenienti da un mondo permeato dall'innovazione come ad esempio Sergey Brin e Larry Page, i fondatori di Google, Tesla può cominciare a produrre vetture competitive dando vita alla Model S, una berlina elegante e pensata per i lunghi viaggi. L'idea dei proprietari di questa casa automobilistica è quella di diffondere sempre di più il concetto di automobile pulita in tutto il mondo. Seppur la Model S sia una vettura pensata per un segmento medio alto di clienti essa è stata la prima auto completamente elettrica immessa nel mercato a livello mondiale. Le automobili Tesla non emettono alcun tipo di gas di scarico e non fanno rumore; possono essere utilizzate anche in città, anche nei periodi di stop al traffico. La ricarica avviene abbastanza velocemente, soprattutto presso i centri supercharger: veri e propri distributori di energia elettrica che si stanno diffondendo ormai in gran parte del mondo.

Quello californiano è il più grande mercato di EV negli Stati Uniti e il secondo più grande al mondo dietro la Cina (se si considera l'Europa come insieme di Stati indipendenti). Le vendite di BEV e PHEV sono state pari a 157.600 unità lo scorso anno, con un aumento del 77%. Di conseguenza, il totale della California è più del doppio di quello della Norvegia, che è il più

grande mercato europeo.

In generale, secondo l'Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, ci sono 153 diversi incentivi in tutti gli Stati Uniti che rientrano tra le categorie di esenzioni, sconti e crediti d'imposta. Alcuni di essi, come gli sconti diretti, hanno un effetto maggiore sulla domanda, mentre altri, come i profitti o gli incentivi privati, hanno un impatto più specifico. Come ci si poteva aspettare, la California ha registrato la maggiore quantità di incentivi con 24, il che aiuta a spiegare la crescente popolarità dei veicoli elettrici tra i consumatori. L'elemento chiave qui è l'importanza dei rimborsi, che sono un incentivo diretto al consumatore finale; in particolare lo stato californiano offre gli sconti più alti per i proprietari di BEV, PHEV e FCEV (*Fuel-Cell-Electric-Vehicle*), che vanno da 2500 a 7000 dollari. Oltre ad altri tre tipi di sconti privati compresi tra i 1000 e i 3000 dollari e a molti altri sconti sulla ricarica, i veicoli elettrici hanno anche la possibilità di accedere alla HOV (*High-Occupancy-Vehicle lane*), una corsia autostrale a scorrimento veloce.

ITALIA

Molti paesi nel panorama globale sono in ritardo nella transizione dall'utilizzo di macchina a combustione interna a macchine completamente elettriche, specie in Italia dove si ha la necessità, oltre che di un repentino cambio di mentalità, anche di maggiori investimenti ed incentivi in questo campo. Attualmente in Italia non c'è un piano strategico nazionale definito in materia di incentivi; gli ecobonus presenti riguardano solo le auto elettriche e le più sofisticate e costose tra quelle ibride: le plug-in. Ma c'è un limite: il prezzo di listino ufficiale deve essere inferiore a 50 mila euro, Iva esclusa (Bisso, De Stefani e Giardino, Marzo 2019) e da ciò si evince chiaramente che il target di potenziali clienti è definito dalla fascia medio alta della società. Gli incentivi all'acquisto di auto a basse emissioni di CO_2 dureranno fino alla fine del 2021, quando l'offerta di modelli con queste caratteristiche sarà sensibilmente più ampia di oggi. Infatti, il 2021 è proprio l'anno a partire dal quale le case automobilistiche dovranno rispettare la soglia di 95 grammi/chilometro di CO_2 , pagando penalità su ogni vettura venduta che la sfiori. Ma cosa frena la vendita dell'auto elettrica? Senza dubbio i costi apportati

dalla necessità di utilizzare una batteria.

Batteria

Una delle cause dell'elevato costo delle macchine elettriche è dovuto alla batteria che alimenta l'energia del veicolo. I principali componenti che costituiscono la batteria di un veicolo elettrico sono i seguenti:

- litio: il cui paese leader del settore è l'Australia, che si contraddistingue per il sistema politico stabile, l'elevata trasparenza e gli ambiziosi standard ambientali
- cobalto: estratto per i due terzi nelle miniere del Congo dove però si hanno problemi legati al lavoro minorile, alle terribili condizioni di sicurezza in cui si lavora, all'inquinamento ambientale e alle malattie legate alla sua estrazione, che colpiscono gravemente chi è impiegato in miniera (Amnesty, 2016).

Secondo la BMO Capital Markets, poichè per la costruzione di una singola batteria servono circa 10 kg di cobalto, nei prossimi due anni è previsto un raddoppio della domanda di cobalto visto che già ora la domanda continua a superare l'offerta esistente di cobalto. Per rispondere in maniera etica a questo problema, in Canada, che è il terzo fornitore mondiale di cobalto, con il 6% circa del mercato, si sta pensando a come estrarlo in maniera sostenibile, specie per il fatto che sono le stesse imprese dell'industria automobilistica a chiederlo, per non affrontare le critiche dell'opinione pubblica.

Un altro motivo che preoccupa i consumatori riguarda l'autonomia della batteria; le migliori e quindi più potenti batterie tutt'oggi installate sui veicoli elettrici consentono nel migliore dei casi di avere un'autonomia di 630 km ed è proprio su questo che la ricerca si sta muovendo. Per sconfiggere la "range anxiety", ovvero la paura di rimanere "a secco" si ha la necessità di incrementare il numero di colonnine dove ricaricare le batterie, che ad oggi in Italia sono solo 7.037 e se paragonate alle 8.965 della Norvegia, il Paese con la più alta densità di auto elettriche al mondo ma che conta solo 5 milioni di abitanti è un numero veramente irrisorio. Altre soluzioni sono da trovarsi nella cosiddetta ricarica wireless: in via di sviluppo è la teoria secondo la

quale le auto potrebbero ricaricarsi mentre viaggiano su autostrade attrezzate con appositi sistemi che consentono la ricarica wireless delle batterie mentre il veicolo è in movimento, sistema che consentirebbe anche di ridurre in prospettiva volume e capacità delle batterie oltre ai tempi di ricarica. Già affermate sono invece stazioni di ricarica wireless specie in Corea del Sud dove gli OLEV (*On-Line Electric Vehicles*) sono del tutto senza fili e traggono l'energia necessaria al proprio funzionamento esclusivamente per induzione dal sottosuolo, dove sono posti i cavi della linea di tensione elettrica. In questo modo non necessitano di batterie di grandi dimensioni (la riduzione è nell'ordine delle 10 volte) e tantomeno di fermarsi ai capolinea per ricaricare.

2.3.3 Tipologie di veicoli elettrici

Veicoli ibridi, plug-in ed elettrici (HEV, PHEV e EV) sono prodotti automobilistici emergenti che hanno capacità di aumentare le prestazioni del veicolo e il risparmio di carburante per ridurre l'impatto ambientale del trasporto privato e non solo. Un'auto a sistema ibrido (detta anche HEV, cioè *Hybrid Electric Vehicle*) sfrutta la presenza di due motori al suo interno: uno elettrico e uno a benzina, che lavorano insieme. In sostanza, il motore elettrico lavora in partenza con l'energia accumulata nelle batterie e dà la spinta necessaria per raggiungere basse velocità; successivamente, superata una certa velocità parte il motore a benzina, che dà una potenza maggiore alla macchina. Da lì in poi i due motori sono in grado di funzionare insieme, anche se il conducente può decidere in qualsiasi momento di viaggiare in modalità esclusivamente elettrica (al momento, solo per brevi tratti). Infine, ogni qual volta la macchina si ferma, i due motori si spengono automaticamente, riducendo nettamente l'impatto ambientale.

L'auto a sistema ibrido plug-in (acronimo PHEV, cioè *Plug-in-Hybrid-Electric Vehicle*) rappresenta un'ulteriore evoluzione dell'auto ibrida. In pratica, un'auto ibrida plug-in può essere pensata come l'insieme di un'auto ibrida e di un'auto elettrica; essa non solo è in grado di ricaricare le batterie direttamente dalla rete elettrica domestica come una qualsiasi auto elettrica, ma può anche utilizzare con efficienza un motore a benzina come fosse un'auto ibrida. In questo modo, l'automobilista non è più preoccupato di esaurire la

carica elettrica quando percorre tragitti lunghi. L'autonomia elettrica dell'auto aumenta considerevolmente e permette all'automobilista di percorrere da 20 a 50 km in modalità completamente elettrica, abbattendo drasticamente le emissioni in città.

La prima auto ibrida

La prima auto ibrida della storia è la Toyota Prius. Il primo modello ibrido della casa giapponese viene messo in commercio nel 1999. Inizialmente il piano produttivo prevedeva appena 200 auto al mese, poi 1000 per diventare 2000 a pochi mesi dal debutto previsto per il Salone di Detroit di Gennaio 1998 con un'anteprima durante la conferenza di Kyoto sulle questioni climatiche del 1997. L'auto, denominata Prius, dall'avverbio latino "prima", riscuote subito consensi e già nel primo anno le immatricolazioni sfiorano le 18000 unità che diventeranno 120000 a fine produzione. Ad attrarre sono i consumi bassi (4,3 l/100 km nel ciclo combinato giapponese) consentiti dal sistema ibrido con motore a benzina da 72CV ed elettrico da 45CV.

La prima auto ibrida plug-in

Nel 2003, Renault ha iniziato a vendere l'Electroad, una versione ibrida plug-in del loro popolare Kangoo, in Europa. Oltre al suo motore, potrebbe essere collegato a una presa standard e ricaricato al 95% in circa 4 ore. Dopo aver venduto circa 500 veicoli, principalmente in Francia, Norvegia e Regno Unito, l'Elect'road viene ridisegnata nel 2007.

Con la disponibilità di veicoli ibridi e l'aumento dei prezzi del gas negli Stati Uniti a partire dal 2004, l'interesse per gli ibridi plug-in è aumentato. Nel 2006, sia Toyota che General Motors hanno annunciato piani per ibridi plug-in.

La prima auto elettrica

Tesla Motors, produttore di auto elettriche californiane, ha iniziato lo sviluppo nel 2004 sulla Tesla Roadster, che è stata consegnata per la prima volta ai clienti nel 2008. La Roadster è stata la prima autovettura interamente elettrica di serie a produzione legale in autostrada a utilizzare celle

di batteria agli ioni di litio e la prima vettura completamente elettrica di serie a percorrere più di 320 km per ricarica. Dal 2008, Tesla ha venduto circa 2450 Roadster in oltre 30 paesi fino a dicembre 2012; ha però smesso di prendere ordini per la Roadster nel mercato statunitense nell'agosto 2011. Il veicolo successivo di Tesla, il modello S, è stato rilasciato negli Stati Uniti il 22 Giugno 2012.

Il mercato delle auto elettriche risulta quindi essere ricco di sfaccettature e di fattori che è bene comprendere a fondo per poterne studiare la loro diffusione; nel capitolo 3 si studierà quindi l'applicazione del modello di Lotka-Volterra a dati reali relativi alle vendite mensili del mercato EV statunitense.

Capitolo 3

Applicazione del modello di Lotka-Volterra alle serie di vendita mensili del mercato EV statunitense

Alla luce delle considerazioni svolte nel capitolo precedente in materia di “green policy” e del mercato delle auto elettriche negli Stati Uniti, si è ritenuto di particolare interesse studiare le dinamiche relative ai due più importanti market players, la statunitense Tesla e la giapponese Nissan. Nello specifico, in questo capitolo vengono studiate le serie storiche dei dati di vendita di auto elettriche prodotte da queste due case automobilistiche, allo scopo di analizzarne la possibile competizione. Nissan e Tesla sono infatti considerate da sempre le maggiori case automobilistiche all’avanguardia nel settore dell’EV; nel 2018 Tesla Model 3 è stata l’auto elettrica più venduta al mondo¹ commercializzata in circa 60.000 esemplari; la best seller nipponica invece si è posizionata al secondo posto confermando il primato in Europa e rimanendo comunque primo costruttore a zero emissioni.

In questo senso quindi si applicheranno varianti del modello di Lotka-Volterra il cui scopo è quello di comprendere le diverse dinamiche presenti nel processo di diffusione di questa particolare tipologia di veicoli e a comprendere meglio quali strategie aziendali si rivelino vincenti in un contesto di questo tipo. Si

¹<https://www.yellowmotori.it/news/tesla-model-3-elettrica-piu-venduta/>.

compierà dapprima una semplice analisi univariata delle serie storiche attraverso la stima del modello di Bass; in seguito si passerà all'applicazione del modello LVch e sue opportune riduzioni, per poi applicare un miglioramento in fase di previsione attraverso un affinamento SARMAX.

3.1 Applicazione del modello di Bass

La prima serie di vendita che si analizzerà sarà quella relativa alla casa automobilistica giapponese di Nissan, in particolare si prenderà in considerazione il modello "Nissan LEAF" (*Leading-Environmentally friendly-Affordable-Family car*). Si andrà a considerare la serie mensile di vendita statunitense che va dal Gennaio 2011 al Febbraio 2019 del modello sopraccitato, il primo veicolo elettrico al 100% prodotto in serie al mondo.

Prima di procedere con l'analisi vera e propria risulta opportuno rappresentare graficamente le vendite istantanee del prodotto in questione per poter osservare se sono presenti particolari trend.

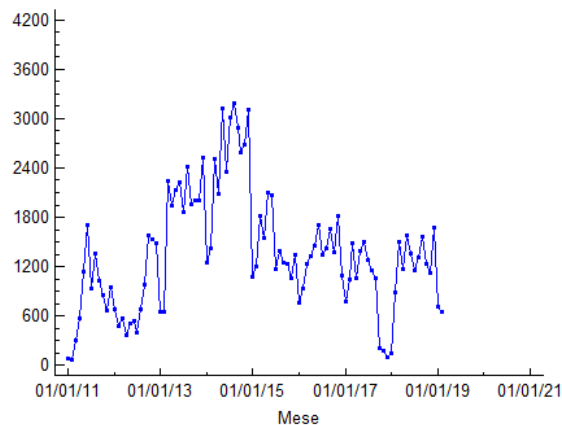


Figura 3.1: Serie di vendita istantanee Nissan Leaf

Dall'analisi della figura 3.1, si può chiaramente notare come all'inizio ci sia un trend crescente che dopo il raggiungimento del picco massimo di pro-

duzione avvenuto nell'Agosto 2014 diventi decrescente. In linea di principio quindi, questo andamento risulta coerente con l'applicazione di un modello per ciclo di vita limitato, come il modello di Bass.

Il secondo prodotto di cui si andranno ad analizzarne le vendite è il modello S di Tesla, macchina esposta per la prima volta al Salone dell'automobile di Francoforte nel 2009 prodotta dall'azienda californiana Tesla Motors a partire dal 2012. Si andrà a considerare la serie di vendita mensile che va dal Giugno 2012 al Febbraio 2019. Qui di seguito si riporta il grafico della serie storica mensile (Figura 3.2).

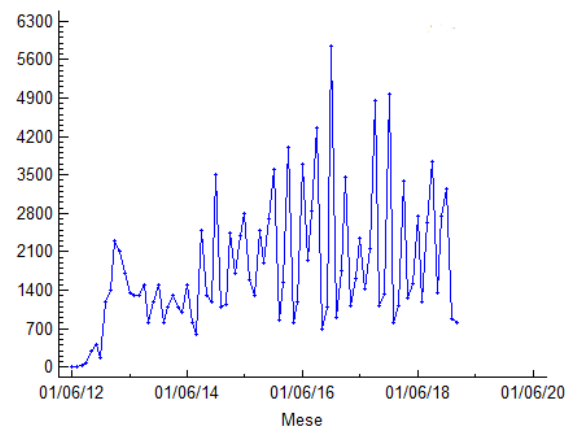


Figura 3.2: Serie di vendita istantanee Tesla S

L'andamento della serie mostra una netta tendenza a crescere fino a raggiungere il picco nel Dicembre 2016, per poi diminuire ma rimanere pressochè stazionario.

Fatte queste considerazioni, si procede alla stima di un modello di Bass standard per entrambe le serie, utilizzando come variabile dipendente le vendite cumulate. Di seguito si riportano i risultati per entrambi i casi in due tabelle distinte.

Tabella 3.1: Stime dei parametri di un modello Bass standard per Nissan-Leaf

Parametro	Stima	Standard Error	Intervallo di confidenza
m	137756	1468.01	(134841, 140670)
p	0.0042866	0.000190955	(0.00390751, 0.0046657)
q	0.0481247	0.00188316	(0.0443862, 0.0518632)

$$R^2 = 0.994384, D-W = 0.0451927$$

Tabella 3.2: Stime dei parametri di un modello Bass standard per Tesla

Parametro	Stima	Standard Error	Intervallo di confidenza
m	196683	2965.61	(190779, 202587)
p	0.003222172	0.0000390772	(0.00314393, 0.00329952)
q	0.0421101	0.000928466	(0.0402616, 0.0439585)

$$R^2 = 0.999238, D-W = 0.59567$$

Dalla tabella 3.1 si nota che il valore del mercato potenziale m (137756) è maggiore del valore di partenza (ottenuto usando come valore iniziale l'ultimo cumulo pari a 133000) questo perchè ci si trova di fronte ad un prodotto che ha verosimilmente completato il proprio ciclo di vita. Il parametro p ha un valore basso molto minore rispetto a quello di partenza posto uguale a 0.01, stando ad indicare un debole contributo degli innovatori. Invece, il valore di q denota una moderata importanza nel processo di diffusione della componente imitativa, testimoniando così una diffusione non fortemente caratterizzata da passaparola. Il coefficiente di determinazione R^2 , che misura la bontà di adattamento del modello, risulta essere elevato e questo potrebbe indurci a credere che il modello sia soddisfacente, fatto sottolineato anche dalla stabilità delle stime, i cui intervalli di confidenza non contengono lo zero. Dalla tabella 3.2 che riporta i risultati relativi a Tesla, si nota invece che il valore del mercato potenziale m (196683) è maggiore rispetto a quello di Nissan. Si nota inoltre che i parametri p e q hanno una somiglianza nel comportamento delle traiettorie con gli stessi nel caso Nissan, ad indicare che gli acquirenti si comportano in modo simile in entrambe le situazioni di compravendita dei



Figura 3.3: Modello di Bass per la serie Nissan Leaf **Figura 3.4:** Modello di Bass per la serie Tesla S

prodotti. Ciò può essere considerato un primo segnale indicante il fatto che i veicoli elettrici considerati siano sostanzialmente sostituibili gli uni agli altri e per questo motivo si ritiene opportuno studiarne le dinamiche in modo congiunto.

I risultati ottenuti dall’applicazione del modello di Bass possono essere visti nelle figure 3.3 e 3.4 dove si può chiaramente notare che l’andamento del modello di Bass è pressochè identico in entrambi i casi considerati.

Le statistiche di *Durbin – Watson* che valutano i residui, stanno ad indicare in entrambi i casi la presenza di una correlazione positiva e significativa tra i residui.

Considerando la somiglianza tra i risultati ottenuti con l’applicazione del modello di Bass, si può pensare di studiare simultaneamente le due serie allo scopo di capire se esiste una interazione; si andrà a verificare ciò nel paragrafo 3.2 mediante la stima del modello di Lotka-Volterra.

3.2 Stima del modello di Lotka-Volterra con “churn”

Per ovviare al limite del modello di Bass si decide di stimare un modello che possa tenere in considerazione entrambe le serie storiche simultaneamente, ovvero il modello di Lotka-Volterra con “churn” (cfr. 1.2.3).

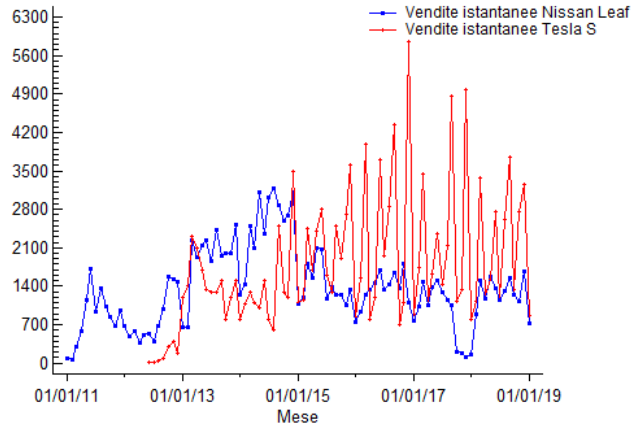


Figura 3.5: Serie mensili di vendita Nissan Leaf e Tesla S

Come è possibile notare dalla figura 3.5 entrambe le serie storiche considerate hanno un andamento crescente e, poichè le vendite relative a Nissan Leaf sono in calo nell'ultima parte del grafico mentre quelle relative a Tesla S sovrastano quelle relative a Nissan, si denota la presenza di una interazione di cui si vuole andare a scoprirne e definirne la natura.

Si considera dapprima la serie di vendita relativa al mercato automobilistico di Nissan Leaf poichè il periodo di messa in vendita delle automobili è antecedente a quella di Tesla S. Per la prima parte della serie si usano le stime relative al modello di Bass precedentemente stimato che si riferiscono alla diffusione dei veicoli elettrici Nissan prima dell'entrata del concorrente Tesla. Come si nota dalla tabella 3.3, le stime del mercato potenziale per la fase di stand-alone presentano instabilità che è causata dalla brevità della serie utilizzata; tuttavia, la previsione congiunta locale è abbastanza stabile. Inoltre si può vedere che il parametro a_1 , che modula il *within-product word-of-mouth* è positivo, $a_1 = 0.0360968$, mentre il parametro b_1 è negativo, $b_1 = -0.250282$ indicando un contributo negativo del *cross-product word-of-mouth*, visto che $\alpha_2 = 0.0839524$. Tuttavia il mercato residuo dei veicoli Nissan conta su un importante contributo di Tesla dovuto all'effetto churn,

cioè $\alpha_2(K_2 - z_2)$. Pertanto, anche se il passaparola derivante dalle vendite dei veicoli Tesla sembra aver avuto un impatto negativo sulle vendite di Nissan, l'analisi del mercato residuo evidenzia che la casa automobilistica Nissan ha, seppur in minima parte, beneficiato della concorrenza. In effetti, l'ingresso dei veicoli Tesla ha avuto l'effetto di espandere il loro mercato in questo specifico settore. In particolare, per Tesla c'è una sorta di effetto di rivitalizzazione, come testimoniato dal valore elevato di α_2 rispetto ad α_1 . Il ciclo di vita parallelo dei veicoli Tesla è caratterizzato da un p_2 positivo così come i parametri a_2 e b_2 sono positivi, quindi entrambi gli effetti concorrono alla diffusione della nuova tecnologia. Inoltre, il valore del parametro churn $\alpha_1 = 2.31493$ indica che le vendite dei veicoli Nissan danno un netto contributo in termini di mercato residuo per le vendite dei veicoli Tesla, visto che α_1 è maggiore di α_2 . In generale il modello LVch risulta molto instabile per poter essere considerato un valido modello capace di spiegare in modo efficiente l'effetto di interazione tra le vendite dei due market players considerati, quindi si procede nel paragrafo 3.3 ad una riduzione del suddetto modello con vincoli sui parametri α per provare ad ottenere un modello con stime più stabili dal punto di vista statistico.

Tabella 3.3: Stima dei parametri del modello LVch

Parameter	Stima	Standard Error	Intervallo di confidenza
p_1	0.00626165	0.0107612	(-0.0149821, 0.0275054)
a_1	0.0360968	0.0759088	(-0.113755, 0.185949)
b_1	-0.250282	6.03895	(-12.1718, 11.6712)
α_2	0.0839524	2.28236	(-4.42167, 4.58957)
K_1	183910	224831	(-259929, 627749)
K_2	153310	455017	(-744940, 1.05156e ⁶)
p_2	0.000964869	0.00490073	(-0.00870969, 0.0106394)
a_2	0.0525124	0.056035	(-0.0581065, 0.163131)
b_2	0.00101048	0.0210253	(-0.0404956, 0.0425166)
α_1	2.31493	9.71776	(-16.8689, 21.4988)

$$R^2 = 0.240537, D-W = 1.90628$$

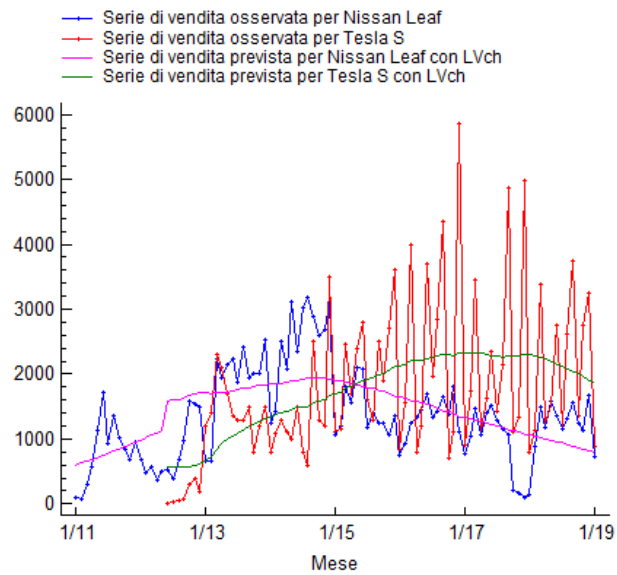


Figura 3.6: Grafico serie di vendita istantanee Nissan Leaf e Tesla S e valori predetti dal modello LVch

3.3 Stima dell'effetto della "cannibalizzazione" diretta

Si è stimato il modello LVch per verificare l'effetto della cannibalizzazione diretta. A tal proposito, si è posto il valore p_2 uguale a zero poichè mediante precedenti prove esso è risultato non significativo, vincolando inoltre i valori di α_1 e α_2 rispettivamente a 1 e 0 (cfr. equazione 1.9). Ciò che si intende verificare è la presenza di asimmetria totale della competizione tra le vendite delle due case automobilistiche, in cui il secondo prodotto (Tesla S) ha accesso completo al mercato residuo del primo (Nissan Leaf). Allo stesso tempo, il primo prodotto può ancora avere un impatto sulle vendite del secondo tramite *cross-product word-of-mouth*, $[\alpha_1 b_2 z_1(t)/(m_2 + \alpha_1 m_1)]$, che può essere sia positivo che negativo dal momento che dipende dal segno del parametro b_2 . Nel caso in cui ciò dovesse essere provato ci si troverebbe nel caso che in letteratura viene definito della *cannibalizzazione diretta*.

Nella tabella 3.4 si mostra l'output delle stime dei parametri relativi al modello. Le stime ottenute dall'analisi possono essere riportate nel seguente sistema di equazioni:

$$\begin{aligned} z_1'(t) &= \left[0.0064285 + \frac{0.0395899 z_1(t)}{146311} \right] [146311 - z_1(t)] \\ z_2'(t) &= \left[\frac{0.0220426 z_2(t) + 0.0251509 z_1(t)}{247554 + 146311} \right] [(247554 - z_2(t)) + (146311 - z_1(t))] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Si vede che la stima del parametro K_1 relativo al mercato potenziale in regime di competizione dei veicoli Nissan risulta essere positivo e maggiore del valore inizialmente posto, fatto che indica una stima stabile nonostante la brevità della serie storica utilizzata; allo stesso modo la stima di K_2 relativa al mercato potenziale di Tesla risulta essere stabile. Il parametro b_2 (coefficiente di imitazione cross-product) che era stato posto ad un valore prossimo allo zero per la stima iniziale, risulta positivo e, in modo sorprendente indica che, seppur in modo esiguo, vi è una sorta di collaborazione tra le due case automobilistiche. Il coefficiente di imitazione within-product $a_1 = 0.0395899$

è positivo per definizione, indicando una risposta positiva degli utenti di Nissan rispetto a questo formato ma ha un valore molto basso segno di una probabile flessione delle vendite. La stima del coefficiente di imitazione p_1 aumenta leggermente rispetto al valore iniziale; non essendo particolarmente elevato ci indica che il processo non è stato caratterizzato da forti meccanismi imitativi. Gli intervalli di confidenza risultano tutto sommato stabili ma per una migliore visione del fenomeno risulta agevole osservare la Figura 3.7 dalla quale risulta evidente che Nissan-Leaf è il primo entrante, mentre Tesla è il concorrente perché entra un anno e mezzo dopo; il mercato residuo di Nissan entra a far parte del mercato di Tesla e in questo senso Tesla cannibalizza Nissan.

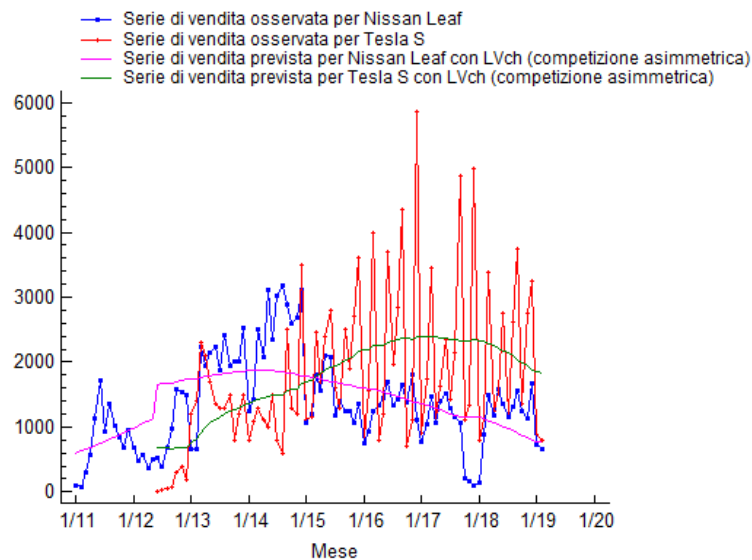


Figura 3.7: Grafico serie di vendita di Nissan Leaf e Tesla S e valori predetti dal modello LVch nel caso della cannibalizzazione diretta

Tabella 3.4: Stima dei parametri del modello LVch nel caso di cannibalizzazione diretta

Parameter	Stima	Standard Error	Intervallo di confidenza
p_1	0.0064285	0.00248619	(0.00152133, 0.0113357)
a_1	0.0395899	0.0103206	(0.0192193, 0.0599604)
K_1	146311	8495.45	(129543, 163079)
a_2	0.0220426	0.0255577	(-0.0284025, 0.0724878)
b_2	0.0251509	0.0118581	(0.00174569, 0.0485561)
K_2	247554	80733	(88204.9, 406902)

$$R^2 = 0.261066, D-W = 1.90204$$

A supporto dell'ipotesi di non significatività del modello LVch completo (cfr. 3.2) si decide di calcolare l'indice \tilde{R}^2 , utile test per verificare la non adeguatezza del modello, come è indicato nella equazione 3.2

$$\tilde{R}^2 = (R_{m_2}^2 - R_{m_1}^2)/(1 - R_{m_1}^2), \quad (3.2)$$

dove $R_{m_i}^2$, $i = 1, 2$ sono gli indici di determinazione standard dei modelli m_i , $i = 1, 2$. Sostituendo i valori osservati nei due modelli si ha:

$$\tilde{R}^2 = (0.261066 - 0.240537)/(1 - 0.240537) = 0.02703, \quad (3.3)$$

valore che indica una debole valenza del modello LVch completo stimato e che quindi giustifica la scelta del modello LVch ridotto come il modello più adeguato per spiegare la competizione, che in realtà si è rivelata essere **collaborazione**, tra le due case automobilistiche.

3.4 Affinamento SARMAX e previsioni *out-of-sample*

Tra i modelli applicati precedentemente, quello che offre un risultato più soddisfacente è il modello LVch nel caso della cannibalizzazione diretta; si prova quindi a migliorarlo ulteriormente applicando un affinamento SARMAX con lo scopo di risolvere il problema dei residui autocorrelati. Poiché il modello precedentemente stimato è dato dalla serie impilata dei dati, per

Tabella 3.5: Previsioni per Nissan Leaf tramite affinamento $SARMAX(6, 0, 4) \times (1, 0, 0)_{12} + 1$ regressore

Parametro	Stima	Standard Error	t	p-value
$AR(1)$	0.369341	0.108591	3.40121	0.001025
$AR(2)$	0.318635	0.105541	3.01905	0.003347
$AR(3)$	0.295149	0.102382	2.88281	0.004991
$AR(4)$	0.534828	0.102746	5.20536	0.000002
$AR(5)$	-0.523711	0.106691	-4.9087	0.000005
$AR(6)$	-0.190046	0.112856	-1.6839	0.095857
$MA(1)$	-0.291039	0.031056	-9.3724	0.000000
$MA(2)$	0.010235	0.025643	0.39915	0.690787
$MA(3)$	0.280426	0.031522	8.89678	0.000001
$MA(4)$	0.978643	0.021938	44.6097	0.000000
$SAR(1)$	0.506914	0.102099	4.96494	0.000004
c	1.11156	0.236506	4.69999	0.000010
$Media$	-185.379	346.857	-0.53445	0.594423
$Costante$	-17.898			

$$Var = 157048 \quad Dev.std = 396.293$$

poter cogliere al meglio gli effetti di entrambe le serie, si compie l'affinamento lavorando sulle serie in modo separato.

Si considera dapprima la serie di vendita relativa al mercato automobilistico di Nissan Leaf, che rappresenta il primo entrante in questo contesto. Per la prima parte della serie si usano le stime relative al modello di Bass precedentemente stimato che si riferiscono alla diffusione dei veicoli elettrici Nissan prima dell'entrata del concorrente Tesla. Il miglior affinamento risulta essere un $SARMAX(6, 0, 4) \times (1, 0, 0)$ con stagionalità posta uguale a 12 (visto che stiamo trattando serie mensili) e un regressore esterno definito dalle previsioni del modello LVch precedentemente calcolate per le vendite dei veicoli Nissan. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

Dalla tabella 3.5 si nota che, il valore del parametro c associato alle previsioni del modello LVch nel caso della cannibalizzazione diretta, risulta sostanzialmente pari ad uno ($c = 1.11156$), indicando un ottimo adattamento medio del modello non lineare scelto per spiegare il trend della serie.

L'affinamento SARMAX coglie oscillazioni, probabilmente dovute a stagionalità e ad autocorrelazione, che il modello LVch precedente non era riuscito a comprendere e risolve l'autocorrelazione positiva dei residui.

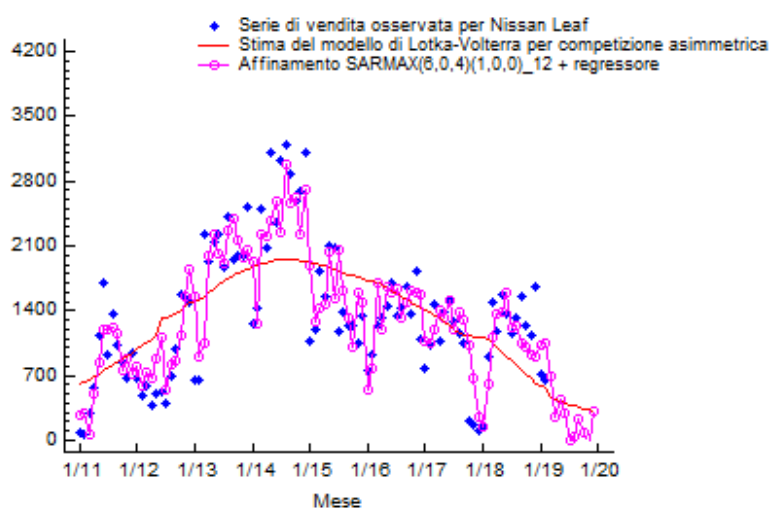


Figura 3.8: Previsioni out-of-sample per Nissan Leaf

Si considera adesso la serie storica per Tesla S; il parametro di calibrazione c è più lontano dal valore ottimo di una unità ($c = 0.798399$) ma risulta essere statisticamente non significativo per cui si ritiene che l'affinamento SARMAX(2,0,1)(1,0,6) sia adeguato (Figura 3.9) per comprendere e risolvere l'autocorrelazione positiva dei residui.

Tabella 3.6: Previsioni per Tesla S tramite affinamento $SARMAX(2,0,1) \times (1,0,6)_{12} + 1$ regressore

Parametro	Stima	Standard Error	t	p-value
<i>AR</i> (1)	-0.750221	0.1433260	-5.23437	0.000002
<i>AR</i> (2)	-0.135965	0.1304480	-1.04230	0.300912
<i>MA</i> (1)	-0.912733	0.0840785	-10.8557	0.000000
<i>SAR</i> (1)	1.168690	0.0136190	85.8135	0.000000
<i>SMA</i> (1)	0.659403	0.0907341	7.26742	0.000000
<i>SMA</i> (2)	0.604650	0.0801237	7.54640	0.000000
<i>SMA</i> (3)	-0.725797	0.0931139	-7.79472	0.000000
<i>SMA</i> (4)	0.731849	0.0773361	9.46324	0.000000
<i>SMA</i> (5)	0.497369	0.0808327	6.15307	0.000000
<i>SMA</i> (6)	-0.385893	0.0955994	-4.03657	0.000000
<i>c</i>	0.798399	0.1517240	5.26219	0.000002
<i>Media</i>	251.202	302.659	0.829983	0.409411
<i>Costante</i>	-79.9289			

$Var = 376184$ $Dev.std = 613.338$

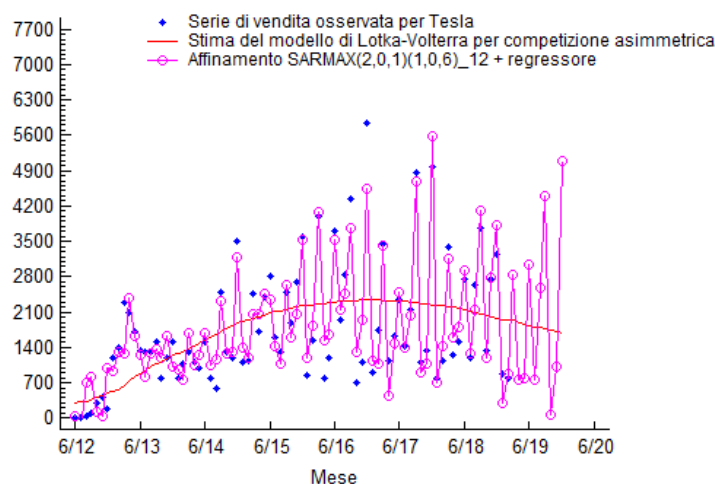


Figura 3.9: Previsioni out-of-sample per Tesla S

Le previsioni ottenute per le vendite di entrambi i prodotti considerati, seguono in generale, un andamento decrescente portando di fatto ad una chiusura del ciclo di vita.

Nel caso di Nissan Leaf è ragionevole che le vendite calino visto che è proprio il competitor Tesla ad inglobare il suo mercato residuo.

Limitatamente al caso di Tesla S invece, il calo delle vendite previsto è meno evidente ma ciò è dovuto in primis alla struttura del modello che porta per sua costruzione ad un declino naturale delle vendite e in secundis alla presenza del modello di generazione successiva, Tesla 3, che ha prezzo inferiore e come tale ne rappresenta un sostituto. Nonostante ciò, è interessante osservare come Tesla abbia creato un mercato in forte espansione a partire da prodotti considerati di “lusso”.

La stima dei modelli di Lotka-Volterra in questo caso ha avuto come scopo primario quello di studiare possibili interazioni tra le vendite delle due case automobilistiche considerate e in secondo luogo avere una indicazione sull'andamento delle vendite future nel breve periodo.

Conclusioni

La classe dei modelli di Lotka-Volterra consente di studiare contemporaneamente più serie storiche e nel caso analizzato sono state considerate serie di vendita mensili delle maggiori case automobilistiche a livello mondiale per auto elettriche: la statunitense Tesla e la giapponese Nissan.

L'applicazione del modello di Lotka-Volterra a una tipologia di veicoli innovativa come le auto elettriche è stato utilizzato per la prima volta nello studio di Liu, Chen e Zhang (2017) dove si è posto il problema sul fatto che l'analisi di serie storiche che descrivono prodotti la cui immissione sul mercato è relativamente recente può portare risultati non del tutto efficienti.

Nello studio svolto in questa tesi, dopo aver introdotto la classe dei modelli di Bass utili alla previsione dei processi di diffusione di varie tipologie di innovazione, e la definizione dei principali metodi statistici utilizzati per le loro stime, si è passati all'applicazione dei modelli di Lotka-Volterra nel contesto delle vendite di auto elettriche negli Stati Uniti d'America. In modo particolare si è scelto di studiare il processo di diffusione che ha contraddistinto le auto Nissan Leaf e Tesla S. Si è dimostrato che la diffusione delle auto della casa giapponese Nissan concorre, contrariamente alle aspettative, alla diffusione delle auto elettriche del brand che in questo caso abbiamo considerato come diretto concorrente, Tesla. Il ruolo del passaparola e del processo imitativo dei consumatori, è risultato fondamentale in questo tipo di applicazione. Il passaparola ha infatti avuto il ruolo di sostenere le vendite durante la diffusione e non di promuovere il prodotto prima della sua entrata nel mercato.

Il modello prescelto per spiegare la competizione tra i due brand automobilistici è il modello LVch ridotto per mezzo del quale si ricava che la serie

storica relativa alle vendite mensili di Nissan è modellata secondo un modello di Bass indipendente; le vendite relative a Tesla S invece beneficiano di quelle di Nissan Leaf attraverso l'accesso al mercato residuo di quest'ultima e al ruolo del passaparola incrociato positivo da parte dei suoi clienti.

Si può quindi affermare che Nissan è stata "cannibalizzata" da Tesla ed ha aiutato la diffusione di quest'ultima, la quale poi è diventata leader di mercato. I risultati ottenuti dallo studio evidenziano come il settore di cui ci si è occupati sia ancora caratterizzato da incertezza dovuta sia alle particolari dinamiche che intercorrono nella diffusione dei prodotti stessi (word-of-mouth e imitazione) sia alle politiche finanziarie e ambientali che agiscono nei paesi in cui questi prodotti vengono commercializzati.

Come si ha avuto modo di vedere negli Stati Uniti agiscono forze contrastanti che in parte spingono e, in parte, deprimono il mercato della e-mobility. Sotto la presidenza di Donald Trump, lo Stato Federale ha infatti annunciato una revisione degli standard per i veicoli tradizionali a vantaggio dei carburanti più inquinanti; al contrario invece una decina di Stati, ha dichiarato di voler proseguire sulla strada delle emissioni zero: la California, la più avanzata, ha fissato al 2040 lo stop per la produzione di veicoli a combustione (Marseglia e Trigari (Marzo 2019)). Va considerato, inoltre, che negli Stati Uniti il costo basso dei carburanti tradizionali e le scelte diverse dei singoli Stati rispetto alla concessione di incentivi fanno sì che la scelta dell'elettrico non sia ancora unanime. La casa automobilistica Tesla che si è imposta nel mercato delle auto di lusso, con l'introduzione del Model S, ha avuto un grande impatto a livello mondiale. Nel primo trimestre del 2019, con l'entrata del Tesla Model 3 (il modello successivo a Tesla S) è risultata essere l'auto premium più venduta sul mercato statunitense. L'auto della casa californiana ha rappresentato da sola il 16% del totale delle vendite di auto premium in USA e il 60% delle vendite di auto elettriche. Nel segmento premium del mercato auto in USA, Tesla è terza dietro a Mercedes e Bmw. Tesla ha fatto da apripista ed ha avuto un ruolo primario nella diffusione delle auto elettriche; secondo Alix-Partners (2017) sono state molte le case automobilistiche a livello mondiale che hanno sviluppato propri modelli di EV, soprattutto cinesi (con i marchi BYD, BAIC, Geely, Zhidou e Jianghuai) ma anche alcuni grandi nomi internazionali, basti pensare a Nissan Leaf, Volkswagen Group's e Hyundai.

Quello dell'auto elettrica è, assieme a mobilità condivisa, guida autonoma e digitalizzazione, uno dei quattro trend del 2018 che avranno un ruolo determinante nello sviluppo del mercato automobilistico del futuro. Secondo Berger (2019), l'auto elettrica è sempre più al centro delle attenzioni dei players del settore grazie alla sua capacità di conquistare sempre più l'interesse dei consumatori di tutto il mondo. L'adozione del modello elettrico, però, sarà influenzata anche da problematiche regionali. Negli Stati Uniti per esempio dipenderà molto dall'andamento del prezzo del carburante tradizionale e da quello delle batterie; in Europa dalle restrizioni di accesso alle città consentite solo alle auto a zero emissioni e in Cina dalle problematiche relative all'inquinamento². Le case automobilistiche e gli stessi governi hanno quindi la necessità di studiare e prevedere l'andamento di un mercato così giovane ma così in grande espansione. Seppur le tipologie di auto studiate abbiano una fascia di prezzo differente e quindi si potrebbe pensare che sia errato metterle a confronto, ciò che risulta particolarmente interessante è che il brand "vincitore" è quello la cui automobile ha un costo maggiore, fatto che starebbe a dimostrare che in questo particolare ambito, il prezzo non è la variabile più importante; l'autoveicolo elettrico risulta quindi amplificare lo "status" di un acquirente.

Per una migliore e più analitica interpretazione del modello sarebbe stato di aiuto disporre dei dati relativi alle diverse tipologie di auto elettriche in questione (a seconda del tipo di batteria e degli optional, il modello dell'auto elettrica cambia e quindi anche il prezzo) e avere informazioni in merito alle caratteristiche dei clienti per poter delineare il target dei potenziali acquirenti e quindi la propensione o meno all'acquisto di un veicolo elettrico, che senza dubbio dipende da molti fattori.

Il modello di Lotka-Volterra è sembrato quindi essere un modello adeguato per prevedere la diffusione di questa particolare tipologia di veicoli automobilistici e per studiare in modo appropriato gli effetti di competizione o collaborazione che possono instaurarsi tra i brand produttori di veicoli elettrici.

²<https://www.insuranceup.it/it/scenari/auto-elettrica-unico-limite-la-tecnologia/>.

Bibliografia

- Abramson, G. e D.H. Zanette (1998). «Statistics of extinction and survival in Lotka-Volterra systems». In: *Physical Review E* 57.4, pp. 4572–4577. DOI: [10.1103/PhysRevE.57.4572](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.57.4572).
- Al-Alawi, Baha M. e T.H. Bradley (2013). «Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling studies». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, pp. 190–203. DOI: [10.1016/j.rser.2012.12.048](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.048).
- AlixPartners (2017). *AlixPartners Automotive Electrification Index*.
- Amnesty, International (2016). *Democratic republic of Congo: "This is what we die for": human rights abuses in the democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt*. Vol. AFR 62/3183/2016. Amnesty International Ltd Peter Benenson House.
- Bass, Frank M. (1969). «A new product growth for model consumer durables». In: *Management science* 15.5, pp. 215–227.
- Berger, R. (2019). *Global Automotive Supplier Study 2019*.
- Bisso, G., L. De Stefani e N. Giardino (Marzo 2019). *La guida del Sole 24 Ore sulle Auto 2019, la nuova ecotassa, ecobonus auto e moto, bonus impianti di ricarica- Settimanale N.08*. Gruppo 24 ore.
- Bornholdt, S., M.H. Jensen e K. Sneppen (2011). «Emergence and Decline of Scientific Paradigms». In: *Phys. Rev. Lett.* 106, pp. 190–203. DOI: [10.1103/PhysRevLett.106.058701](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.058701).
- Cao, J. e P.L. Mokhtarian (2014). «The future demand for alternative fuel passenger vehicles: a diffusion of innovation approaches». In: *UC Davis – Caltrans Air Quality Project*.

- Cazzola, P., M. Gorner e S. Scheffer (2018). «Nordic EV Outlook 2018: insights from leaders in electric mobility». In: *International Energy Agency*.
- Cazzola, P., D. Turk e T. Bunsen (2018). «Global EV Outlook 2018: towards cross-modal electrification». In: *International Energy Agency, France*.
- Dalla Valle, A. (2014). «A new competition model combining Lotka-Volterra model and the Bass model in pharmacological market competition». In: Gnann, T., T.S Stephens e Z. Lin (2018). «What drives the market for plug-in electric vehicles?-A review of international PEV market diffusion models». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, pp. 158–164. DOI: [10.1016/j.rser.2018.03.055](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.055).
- Guidolin, M. e R. Guseo (2015). «Technological change in the US music industry: Within-product, cross-product and churn effects between competing blockbusters». In: *Technological Forecasting and Social Change* 99, pp. 35–46. DOI: [10.1016/j.techfore.2015.06.023](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.06.023).
- (2018). «On inverse product cannibalisation: a new Lotka-Volterra model for asymmetric competition in the ICTs». In: *arXiv preprint arXiv:1811.03362*.
- Guidolin, M., R. Guseo e C. Mortarino (2019). «Regular and promotional sales in new product life cycles: Competition and forecasting». In: *Computers & Industrial Engineering* 130, pp. 250–257.
- Guseo, R. (2004). «Organizzazione statistica dell'informazione e scelte di gestione: Teoria». In: *Tecniche e Mini-Stage Aziendali, 2nd edition, Cedam, Padova*.
- (2014). «Interventi strategici e aspetti competitivi nel ciclo di vita di innovazioni». In: Dipartimento di Scienze Statistiche, Università degli studi di Padova.
- Guseo, R. e C. Mortarino (2013). «Within-brand and cross-brand word-of-mouth for sequential multi-innovation diffusions». In: *IMA Journal of Management Mathematics* 25, 287–311. DOI: [doi:10.1093/imaman/dpt008](https://doi.org/10.1093/imaman/dpt008).
- Heskett, J.L. (1976). *Marketing*. Macmillan, New York.
- Kerin, R., M. Harvey, J.T. Rothe et al. (1978). «Cannibalism and new product development». In: *Business Horizons* 21.5, pp. 25–31.

- Lee, Seong-Joon, Deok-Joo Lee e Hyung-Sik Oh (2005). «Technological forecasting at the Korean stock market: A dynamic competition analysis using Lotka-Volterra model». In: *Technological Forecasting and Social Change* 72.8, pp. 1044–1057.
- Liu, S., H. Chen e G. Zhang (2017). «Comparison of the Short-Term Forecasting Accuracy on Battery Electric Vehicle between Modified Bass and Lotka-Volterra Model: A Case Study of China». In: *Journal of Advanced Transportation* 17, pp. 433–449. DOI: [10.1155/2017/7801837](https://doi.org/10.1155/2017/7801837).
- Mahajan, V. e E. Muller (1979). «Innovation diffusion and new product growth models in marketing». In: *The Journal of Marketing* 43, pp. 55–68.
- Marseglia, C. e B. Trigari (Marzo 2019). «La mobilità sostenibile e i veicoli elettrici - Rapporto 2019». In: *Repower*.
- Mason, C.H. e G.R. Milne (1994). «An approach for identifying cannibalization within product line extensions and multi-brand strategies». In: *Journal of Business Research* 31.2-3, pp. 163–170.
- Moorthy, K. (1984). «Market segmentation, self-selection, and product line design». In: *Marketing Science* 3.4, pp. 288–307.
- Morris, S.A e D. Pratt (2003). «Analysis of the Lotka–Volterra competition equations as a technological substitution model». In: *Technological Forecasting and Social Change* 70.2, pp. 103–133.
- Noel, Lance et al. (2018). «Conspicuous diffusion: Theorizing how status drives innovation in electric mobility». In: *Environmental Innovation and Societal Transitions*.
- Novelli, F. (2013). «Measuring Sales Cannibalization in Information Technology Markets: Conceptual Foundations and Research Issues». In: *International Conference of Software Business*. Springer, pp. 31–42.
- Rogers, E.M (1983). *Diffusion of innovations*. London. The free press.
- Ryan, B. e N.C. Gross (1943). «The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities.» In: *Rural sociology* 8.1, p. 15.
- Seber, GAF e C.J. Wild (1989). «Nonlinear Regression». In: *New Jersey: Wiley* 62, p. 63.
- Veblen, T. e M. Banta (2009). «The Theory of the Leisure Class. Reissued.» In: *Oxford World's Classics*.

- Yushan, L., M. Gangyi e L. Lefei (2017). «Development of a Generalization Bass Diffusion Model for Chinese Electric Vehicles Considering Charging Stations». In: *2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)*. IEEE, pp. 148–156. DOI: [10.1109/ES.2017.31](https://doi.org/10.1109/ES.2017.31).