

LIBERA UNIVERSITÀ INTERNAZIONALE DEGLI STUDI SOCIALI
"LUISS - GUIDO CARLI"



DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E FINANZA

Corso di Laurea in "Banche e Intermediari Finanziari"

**Influenza dei Prezzi del Petrolio e delle Componenti delle
Batterie Elettriche sul Titolo Azionario di Tesla:
applicazione di un Vector Error Correction Model**

RELATORE:

Prof. Federico Carlo Eugenio Carlini

CORRELATORE:

Prof. Paolo Santucci De Magistris

CANDIDATO:

Filippo Fortuna
Matr. 754951

Anno Accademico 2023-2024

Indice

Introduzione	3
<u>1.</u>Introduzione a Tesla	5
1.1. La storia di Tesla: la fase della fondazione e i primi modelli	8
1.2. Statistiche di mercato di Tesla dalle prime fasi	9
1.3. Le componenti del veicolo elettrico di Tesla: la batteria	12
<u>2.</u>Studio.....	17
2.1. Motivazioni e obiettivi dello studio.....	17
2.2. Scelta dei dati	19
<u>3.</u>Analisi Empirica con VECM	27
3.1. Concetti preliminari: Non Stazionarietà e Stazionarietà	27
3.2. Introduzione al Vector Error Correction Model.....	35
3.2.1. Cointegrazione e Test di Johansen	37
3.3. Configurazione e Applicazione del Modello	41
3.3.1. Risultati dell'Analisi Empirica	41
3.4. Analisi Dinamica: Impulse Response Function e Causalità di Granger.....	50
3.5. Forecasting	63
<u>4.</u>Conclusioni	72
<u>5.</u>Bibliografia.....	75

Introduzione

La crescente attenzione verso la mobilità sostenibile e la transizione energetica ha reso il settore delle auto elettriche sempre più strategico, aumentando l'interesse per le dinamiche finanziarie delle aziende protagoniste del mercato. L'adozione su larga scala dei veicoli elettrici è vista come un elemento chiave per la riduzione delle emissioni globali di CO_2 , spingendo governi e istituzioni a incentivare la transizione attraverso politiche fiscali e talvolta normative.

In questo contesto, Tesla si è affermata come uno dei principali attori globali, diventando la casa automobilistica di maggior valore al mondo e superando storici colossi del settore, con una capitalizzazione di mercato che ha superato i 1000 miliardi di dollari¹. La crescita del titolo è stata alimentata sia dall'innovazione tecnologica e dall'espansione della produzione, sia dal crescente interesse degli investitori per il settore della mobilità elettrica. Tuttavia, il valore delle azioni Tesla è caratterizzato da una significativa volatilità, influenzata da molteplici fattori economici e finanziari.

In particolare, l'andamento del titolo è condizionato da elementi esterni che incidono sulle condizioni dell'industria dei veicoli elettrici, come la domanda globale di veicoli, le politiche di incentivazione e le fluttuazioni nei prezzi delle materie prime essenziali per la produzione delle batterie. Questi fattori possono avere un impatto sulla redditività dell'azienda e sulla percezione degli investitori, determinando oscillazioni significative del valore azionario.

Alla luce di queste considerazioni, questa tesi si propone di analizzare l'andamento del prezzo delle azioni di Tesla in relazione a variabili economiche che possono influenzare, direttamente o indirettamente, il settore dei veicoli elettrici: il prezzo del Brent Oil e delle principali materie prime utilizzate nelle batterie elettriche. Lo studio si basa su un'analisi econometrica, applicando su un *Vector Error Correction Model* (VECM) per valutare l'esistenza di una relazione di lungo periodo tra queste variabili e identificare i meccanismi di aggiustamento che si attivano in risposta a uno *shock* di mercato. Attraverso questa metodologia, la ricerca fornisce una prospettiva quantitativa

¹ Yahoo Finance. (n.d.). Tesla, Inc. (TSLA) stock price, news, quote & history. *Yahoo Finance*. Retrieved February 7, 2025, from <https://it.finance.yahoo.com/quote/TSLA/>.

sulle interazioni tra i fattori analizzati, contribuendo a una maggiore comprensione delle determinanti finanziarie che influenzano il titolo Tesla.

La tesi è articolata in quattro capitoli. Il primo capitolo introduce il contesto di riferimento, delineando l'evoluzione del settore della mobilità elettrica e il ruolo di Tesla nel mercato globale. Nel secondo capitolo viene descritta la selezione delle variabili e le motivazioni dello studio, approfondendo il legame tra le materie prime, il prezzo del petrolio e il valore delle azioni Tesla. Il terzo capitolo è dedicato all'esposizione della metodologia adottata e alla presentazione dei risultati dell'analisi empirica, evidenziandone le implicazioni economiche e finanziarie. Infine, nel quarto capitolo vengono sintetizzate le principali conclusioni della ricerca, discutendone le implicazioni e suggerendo possibili sviluppi futuri.

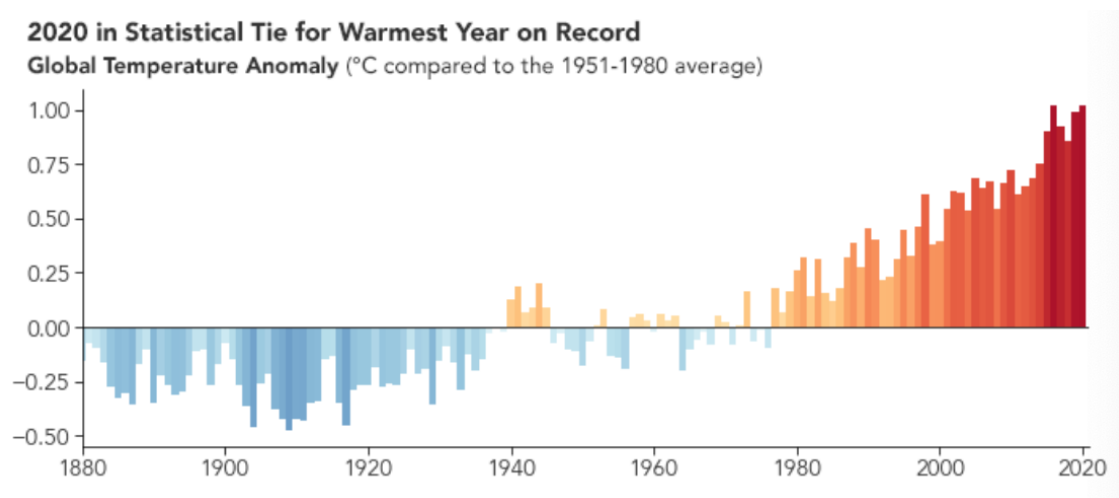
Capitolo 1

Introduzione a Tesla

Negli ultimi decenni abbiamo assistito a una vera e propria rivoluzione in ambito tecnologico, la quale ha permesso di evolvere lo stile di vita delle persone attraverso innovazioni che hanno consentito una maggior velocità di comunicazione, crescenti capacità computazionali e una sempre più attenzione alle tematiche legate alla sostenibilità ambientale.

Questi fattori hanno in particolar modo contribuito ad accrescere l'importanza e le preoccupazioni attribuite al surriscaldamento globale. Secondo gli scienziati del *Goddard Institute for Space Studies* (GISS) della NASA, dalla fine del XIX secolo la temperatura media del pianeta è aumentata di 1.2 gradi centigradi, in cui i picchi assoluti sono stati registrati negli anni 2016 e 2020 comparati alla media campionaria delle temperature registrata tra il 1951 e il 1980.

Figura 1 - Evoluzione della Temperatura Media



In accordo con quanto afferma lo stesso direttore del GISS, Gavin Schmidt, la fonte di preoccupazione più importante non è tanto il dato anomalo in sé, piuttosto essa è riconducibile all'evidente esistenza di un *trend* a lungo termine, affermando che “se

l'impatto umano sul clima continua a crescere, allora dobbiamo aspettarci che i record continueranno ad essere battuti”².

Una simile ricerca è stata condotta anche dalla *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) attraverso la quale è stato riscontrato che i 7 anni più caldi sono stati tutti registrati dal 2014 al 2020, dove quest'ultimo ha rappresentato il quarantaquattresimo anno consecutivo in cui le temperature terrestri sono risultate superiori alla media del XX secolo³.

Secondo quanto riportato sul sito della Commissione Europea, si stima che le cause naturali abbiano contribuito ad innalzare la temperatura terrestre di solo 0,1 gradi centigradi in oltre un secolo⁴.

La comunità scientifica è concorde nell'attribuire le cause principali del riscaldamento globale all'emissione di gas serra nell'atmosfera, contribuendo così all'alimentazione dell'effetto serra. L'emissione di tali gas tra i quali anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4) e gas fluorati è principalmente dovuta all'attività umana. In particolare, secondo l'Agenzia Europea dell'Ambiente, nel 2022 il settore dei trasporti ha contribuito per circa un quarto delle emissioni totali di gas serra nell'UE, con il trasporto su strada responsabile del 73,2% delle emissioni⁵. Questo settore è l'unico ad aver visto una crescita delle emissioni dal 1990 al 2019, pari al 33,5%⁶.

² NASA Earth Observatory. (n.d.). 2020 tied for warmest year on record. *NASA Earth Observatory*. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>.

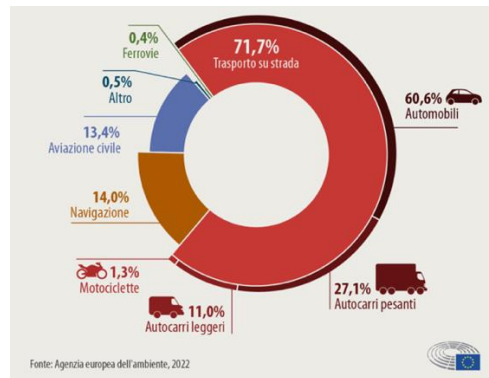
³ National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021, January 14). 2020 was Earth's 2nd-hottest year, just behind 2016. *NOAA*. <https://www.noaa.gov/news/2020-was-earth-s-2nd-hottest-year-just-behind-2016>.

⁴ Climate Action. (n.d.). Le cause dei cambiamenti climatici. *Commissione Europea*. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it.

⁵ European Environment Agency. (2023). Greenhouse gas emissions from transport. *EEA*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>.

⁶ Parlamento Europeo. (2019, March 25). Emissioni di CO_2 delle auto: i numeri e i dati. *Tematiche / Parlamento Europeo*. <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica>.

Figura 2 - Cause Principali di Emissione di Gas Serra



È evidente che per affrontare tale problematica è necessario in primis promuovere lo sviluppo di tecnologie più sostenibili nel settore dei trasporti, l'utilizzo di fonti di energia più pulite e l'adozione di politiche opportune atte a mitigare l'emissione dei gas serra. In tal senso, il Consiglio Europeo ha approvato il 30 giugno 2021 la normativa europea sul clima⁷, attraverso la quale si intende abbattere le emissioni del 55% per il 2030 con l'obiettivo vincolante di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. In particolare, l'UE intende incoraggiare la mobilità elettrica attraverso l'immissione sul mercato di una quota sempre maggiore di veicoli a zero emissioni, stabilendo che a partire dal 2035 sarà vietata la vendita tutti i veicoli leggeri a combustione interna. Tale rivoluzione del comparto automobilistico vede come protagonisti i veicoli elettrici, i quali differiscono dai veicoli endotermici per il fatto che non sfruttano la combustione di fonti fossili derivate dal petrolio per la propulsione, riducendo dunque le emissioni di sostanze inquinanti nell'aria. Le batterie di tali veicoli sono infatti in grado di generare energia elettrica pulita essendo principalmente costituite da materiali quali litio, cobalto e nickel⁸.

Uno studio dell'istituto di ricerca indipendente *International Council on Clean Transportation* (ICCT) ha evidenziato infatti come, in Europa, i veicoli elettrici abbattano le emissioni di CO_2 fino al 70% considerando tutto il ciclo di vita delle

⁷ Unione Europea. (2021, June 30). Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 («Normativa europea sul clima»). *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>.

⁸ Bhutada, G., & Alexander, A. (2022, May 2). The key minerals in an EV battery. *Visual Capitalist*. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>.

vetture⁹, cifre che continueranno ad aumentare se si tiene conto delle politiche adottate dai paesi europei e aspettandosi che altre nazioni ne seguano l'esempio.

Tale settore si è imposto dunque come un *megatrend* sulla scia dell'innovazione tecnologica e sembra destinato a continuare a crescere in futuro.

In questo scenario di crescente attenzione alla sostenibilità e alla transizione verso forme di mobilità più ecologiche, Tesla Motors ha avuto un ruolo pionieristico, avendo rivoluzionato il mercato automobilistico con la produzione di veicoli elettrici ad alte prestazioni e dotati di un'autonomia sempre più competitiva, contribuendo in modo significativo alla loro diffusione.

1.1. La storia di Tesla: la fase della fondazione e i primi modelli

Tesla è stata fondata nel 2003 da una comunità di sviluppatori che ha deciso di dimostrare che i veicoli elettrici non devono necessariamente rappresentare un "compromesso", ma che possono essere migliori, più veloci e più maneggevoli dei tradizionali veicoli a benzina. Oggi Tesla non produce solo automobili completamente elettriche, ma anche sistemi di produzione e stoccaggio di energia sostenibile che sono perfettamente scalabili. Secondo Tesla, infatti, quanto prima il mondo si sarebbe allontanato dai combustibili fossili per dirigersi verso un futuro a zero emissioni.

L'azienda è stata fondata da Martin Eberhard e Marc Tarpenning il 1° luglio 2003, con il nome di Tesla Motors, Inc. I ruoli di CEO e CFO sono stati ricoperti rispettivamente da Eberhard e Tarpenning. Nel 2004 Elon Musk entra a far parte della società nella qualità di investitore principale¹⁰.

Le automobili Tesla vengono assemblate negli stabilimenti dell'azienda a Fremont, in California, e nella Gigafactory di Shanghai.

La Roadster ha debuttato con la tecnologia all'avanguardia delle batterie e del motore elettrico di Tesla nel 2008. Da allora, Tesla ha creato la Model S, la prima berlina elettrica di lusso al mondo, che è diventata la migliore auto della sua categoria con la

⁹ Bieker, G. (2021, July). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. *International Council on Clean Transportation (ICCT)*. https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf.

¹⁰ Barcelò Lattanzi, A. (2018). Elon Musk. L'imprenditore che ha portato il futuro nel presente. *Area 51 Publishing*.

più grande autonomia di qualsiasi veicolo elettrico, aggiornamenti software che la migliorano nel tempo e un record di velocità da 0 a 100 mph (circa 161 km/h)¹¹, grazie ad un potente motore a corrente alternata. È stata il primo veicolo elettrico di serie omologato per l'uso di batterie agli ioni di litio e il primo veicolo elettrico di serie a percorrere più di 320 chilometri (200 miglia) per carica¹². È anche passata alla storia come la prima automobile di serie a essere lanciata in una missione di prova nello spazio, il 6 febbraio 2018, nel volo inaugurale del grande razzo Falcon Heavy, con un manichino astronauta al volante¹³.

La Figura 3 rappresenta il primo modello della Roadster di Tesla.



Figura 3 – Tesla Roadster Sport 2.5.

1.2. Statistiche di mercato di Tesla dalle prime fasi

Nel 2022 Tesla non solo ha battuto le previsioni degli analisti con un utile netto attribuibile agli azionisti di 2,3 miliardi di dollari nel primo trimestre e un totale di 5,5 miliardi di dollari nel 2021, ma ha anche raggiunto la conclusione di un percorso decennale verso la piena redditività e l'uscita dalla crisi alle proprie condizioni. Come indica il nostro grafico (Figura 4), il percorso verso questo obiettivo non è stato privo di sfide. Per la prima volta, ad esempio, Tesla ha generato profitti puliti anziché perdite nel 2020. Ciò suggerisce un crescente interesse per l'adozione di veicoli elettrici a batteria in tutto il mondo, dopo che i modelli S e X della casa automobilistica, introdotti rispettivamente nel 2012 e nel 2015, non sono riusciti a generare entrate

¹¹ Kalashnikov, S. (2016). All interesting facts about Tesla Model X, well-known today. *Moscow Tesla Club*.

¹² Wikipedia contributors. (2025b, January 1). Tesla Roadster (first generation). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster_%28first_generation%29.

¹³ Spagnuolo, M. (2019). Geopolitica dell'Esplorazione Spaziale: La sfida di Icaro nel terzo millennio. *Rubbettino Editore*.

significative. La Figura 4 mostra l'incremento del tasso di mercato di Tesla negli anni che vanno dal 2012 al 2021¹⁴.



Figura 4 – La corsa di Tesla verso il profitto

Martin Viecha, responsabile delle relazioni con gli investitori di Tesla, ha dichiarato su Twitter che oltre il 90% delle automobili vendute nel 2021 saranno motori a combustione interna; tuttavia, ha anche affermato che sono proprio tali motori a perdere quote di mercato a favore dei veicoli elettrici analoghi¹⁵. Infatti, nonostante il predominio dei veicoli con motore a scoppio, le grandi case automobilistiche hanno incrementato le vendite di veicoli elettrici e ibridi. Ad esempio, è il caso della Audi che ha dichiarato che a partire dal 2026 produrrà unicamente auto elettriche, abbandonando gradualmente i motori a combustione interna entro il 2033¹⁶; mentre la Volvo, che in un primo momento aveva fissato la medesima scadenza al 2033, ha fatto un passo indietro

¹⁴ Business-Essay. (n.d.). The Tesla and Ford firms' business strategies. *Business-Essay.com*. <https://business-essay.com/the-tesla-and-ford-firms-business-strategies/>.

¹⁵ Viecha, M. [@MartinViecha]. (2021, November 11). [Tweet]. X. <https://x.com/MartinViecha/status/1458807963829690370>.

¹⁶ Ansa. (2021, August 26). Audi accelera trasformazione, da 2026 solo auto elettriche. *Agenzia ANSA*. https://www.ansa.it/canale_motori/notizie/industria/2021/08/26/audi-accelera-trasformazione-da-2026-solo-auto-elettriche_e6cbb19e-3511-4c96-b70c-d42f233f02a2.html.

rinunciando all'obiettivo *full-Electric* nel 2030¹⁷; al contrario, Nissan ha confermato di voler lanciare una gamma unicamente elettrica in Europa entro il 2030¹⁸.

A maggio del 2024, la casa automobilistica statunitense, pioniera nell'introduzione dei veicoli elettrici nel mercato di massa, conservava ancora la maggiore quota di mercato tra tutti i BEV venduti nel mondo nel 2024, ma solo di poco. Nel 2023¹⁹, la quota di Tesla si è attestata al 19% prima di scendere al 17% nei primi cinque mesi del 2024²⁰, secondo le analisi di EV Volumes.

La concorrenza è ora al passo con Tesla. Come mostra la Figura 5²¹, il conglomerato cinese BYD, che produce batterie per veicoli elettrici autonomi e l'elettronica associata, oltre a veicoli ibridi plug-in e completamente elettrici, ha aumentato la sua quota di mercato di 9 punti percentuali tra il 2021 e il 2024.

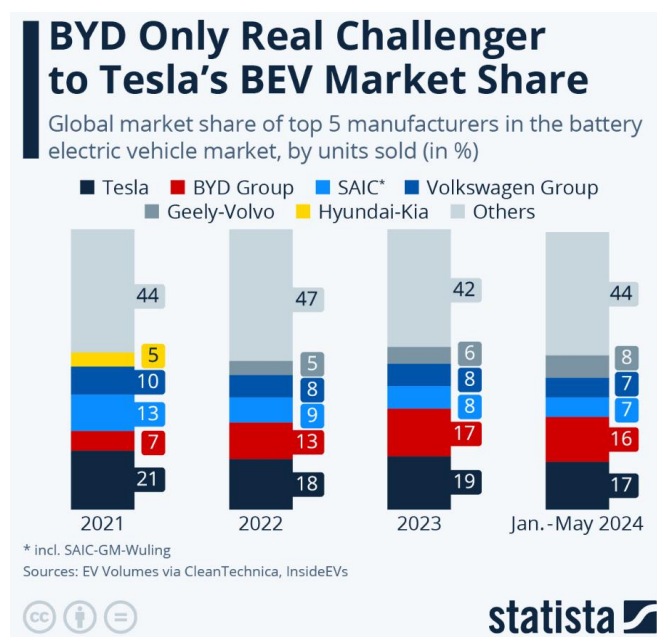


Figura 5 – BYD è l'unico vero sfidante della quota di mercato BEV di Tesla.

¹⁷ Forbes Italia. (2024, September 5). Volvo fa retromarcia: rinuncia a produrre solo auto elettriche entro il 2030. *Forbes*. <https://forbes.it/2024/09/05/volvo-rinuncia-produrre-solo-auto-elettriche-entro-2030/>.

¹⁸ Il Sole 24 ORE. (2023, September 26). Nissan: entro il 2030 in Europa solo auto elettriche. *Il Sole 24 ORE*. <https://www.ilsole24ore.com/art/nissan-entro-2030-europa-solo-auto-elettriche-AFFp50z>.

¹⁹ Kane, M. (2024, February 10). Tesla and BYD had 35% of the global EV market in 2023. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/707935/world-top-ev-oem-sales-2023q4/>.

²⁰ Kane, M. (2024b, July 8). Global plug-in car sales hit 1.3 million in May 2024. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/725811/global-plugin-car-sales-may2024/>.

²¹ Manners, D. (2024, September 19). BYD the only challenger to Tesla. *Electronics Weekly*. <https://www.electronicsworld.com/blogs/mannerisms/markets/byd-the-only-challenger-to-tesla-2024-09/>.

Il portafoglio BEV di case automobilistiche tradizionali come Volkswagen e Geely-Volvo si è attestato rispettivamente al 7 e all'8%, mentre SAIC, che comprende la *joint venture* tra le aziende statali cinesi SAIC Motor, Wuling e General Motors, aveva anch'essa una quota di mercato del 7% secondo gli ultimi dati disponibili.

Tra il 2023 e il periodo gennaio-maggio 2024, la quota di BYD è scesa di un punto percentuale, mentre quella di Tesla di due. Nell'ultimo anno, le consegne di BYD sono state inferiori a quelle di Tesla solo di circa 24000 auto, a dimostrazione di quanto sia diventata serrata la gara tra queste due aziende²².

Secondo EV Volumes²³, nel 2023 saranno venduti 14 milioni di veicoli elettrici a livello globale, il 70% dei quali sono BEV. Tuttavia, l'84% di tutti i veicoli leggeri venduti continuerà a essere alimentato con motori a combustione tradizionali o altre fonti di carburante non elettriche.

Nonostante l'aumento della concorrenza e un 2024 che non ha rispettato le aspettative, l'azienda di Elon Musk prevede un'importante crescita delle vendite nel 2025, compresa tra il 20% e il 30%²⁴.

1.3. Le componenti del veicolo elettrico di Tesla: la batteria

La batteria utilizzata da Tesla è una batteria al litio ternaria, attualmente molto diffusa; infatti, la maggior parte dei veicoli elettrici puri utilizza questa tecnologia²⁵.

Dalla Figura 6 sottostante può osservarsi che la differenza principale tra la batteria al litio ternaria e la batteria al litio-fosfato di ferro è la differenza del materiale dell'elettrodo positivo, che rende le prestazioni complessive della batteria significativamente diverse.

²² Annicchiarico, A. (2025, January 2). Tesla, primo storico calo delle consegne nel 2024. Crollo in Borsa. // Sole 24 ORE. <https://www.ilsole24ore.com/art/tesla-consegne-calo-2024-resta-numero-ma-byd-e-un-soffio-AG3vhp5B>.

²³ Irle, R. (2024, January 22). Global EV sales for 2023. EV Volumes. <https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/>.

²⁴ Annicchiarico, A. (2025b, January 30). Tesla delude sui margini ma promette nuovi modelli nel 2025. // Sole 24 ORE. <https://www.ilsole24ore.com/art/tesla-delude-margini-quarto-trimestre-titolo-scende-4percento-AGjPt2cC>.

²⁵ Shi, M. (2023). Design of high-performance electrodes for Tesla batteries.

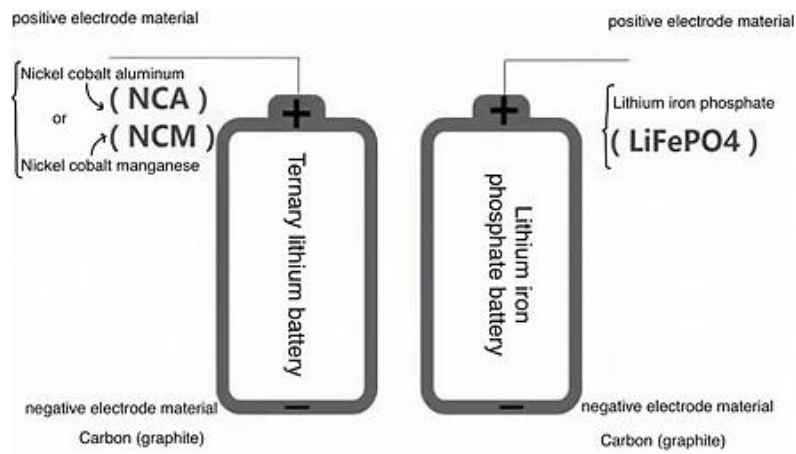


Figura 6 – Confronto tra batteria al litio ternaria e batteria al litio ferro fosfato

Di seguito, i vantaggi e svantaggi della batteria al litio-fosfato di ferro e della batteria al litio ternaria²⁶:

1. Densità di energia: le batterie al litio ternario offrono una densità energetica circa 1.7 volte superiore rispetto a quelle al litio-ferro-fosfato, risultando più leggere e compatte, riducendo conseguentemente il peso del veicolo;
2. Prestazioni di sicurezza: le batterie al litio-ferro-fosfato garantiscono maggiore stabilità termica e sicurezza, soprattutto ad alte temperature, riducendo il rischio di malfunzionamenti;
3. Durata: nel processo di attenuazione della capacità dal 100% all'80%, la durata dei cicli di carica e scarica della batteria al litio-fosfato di ferro può raggiungere i 3500 cicli, mentre la batteria al litio ternaria arriva a circa 2500 cicli;
4. Prestazioni a bassa temperatura: la temperatura limite di esercizio della batteria al litio-ferro-fosfato è di -20 gradi *celsius* (C°), mentre quella della batteria al litio ternaria è di -30 gradi C°.

- La forma delle celle della batteria

Quando l'azienda ha iniziato il suo progetto con la Tesla Roadster, le opzioni per le batterie agli ioni di litio erano limitate. Tesla decise di utilizzare semplicemente batterie cilindriche di tipo 18650 (anche denominate 1865), progettate per usi generici ma adattate ai veicoli elettrici.

²⁶ Shi, M. (2023). Design of high-performance electrodes for Tesla batteries.

Erano difficili da usare, a causa dell'elevato numero di piccole celle nel gruppo batteria (diverse migliaia), ma disponibili in grandi volumi e con una qualità stabile. Tesla, grazie a un'avanzata gestione elettrica e termica (raffreddamento a liquido), ha scelto di seguire la strada più pragmatica.

Le celle 1865 sono state impiegate nella Tesla Roadster e nei modelli Model S e Model X, comprese le versioni aggiornate. Il principale fornitore di queste batterie per Tesla è Panasonic, con produzione in Giappone.

Con il tempo, Tesla ha riconosciuto la necessità di batterie con maggiore capacità per singola cella, in modo da ridurre il numero complessivo di celle nel pacco batteria e ottimizzare l'efficienza dei veicoli elettrici. Da questa esigenza è nata la cella cilindrica 2170, introdotta su larga scala nei modelli Tesla Model 3 e Model Y, oltre che per i sistemi di accumulo energetico come *Powerwall* e *Powerpack*.

La produzione iniziale delle celle 2170 è stata affidata a Panasonic, presso la Tesla Gigafactory 1 in Nevada. Negli ultimi anni, anche LG Energy Solution (parte di LG Chem) è diventata un fornitore, producendo queste batterie principalmente in Cina per la Gigafactory di Shanghai.

L'ultima evoluzione delle celle cilindriche è il formato 4680, introdotto nel 2022.

Questa nuova cella è cinque volte più grande rispetto alla 2170, garantendo maggiore efficienza e riducendo il numero complessivo di celle necessarie per ogni veicolo.

Tuttavia, la sua produzione risulta più complessa a causa delle dimensioni e delle nuove tecnologie impiegate. Per affrontare questa sfida, Tesla ha avviato lo sviluppo e la produzione interna delle celle 4680 nei suoi stabilimenti in California e Texas, mentre contemporaneamente sta incentivando i suoi fornitori, tra cui Panasonic, ad accelerare il processo produttivo per soddisfare la crescente domanda²⁷.

Questi sono i tre tipi di celle cilindriche che Tesla nelle sue auto elettriche. Tuttavia, esiste anche una tipologia di formato prismatico, impiegata per le batterie LFP e fornita da CATL (*Contemporary Amperex Technology Co., Limited*). Nel primo trimestre del 2022, circa il 50% dei veicoli Tesla era equipaggiato con batterie LFP prismatiche²⁸.

Questa scelta rappresenta un chiaro esempio di adattamento alla domanda del mercato,

²⁷ Kane, M. (2022, May 13). Panasonic: Tesla asked us to speed up development of 4680-type batteries. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/585713/panasonic-tesla-speed-up-development-4680-batteries/>.

²⁸ Nedelea, A. (2022, April 21). Almost half of all Teslas built in Q1 had the LFP battery pack. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/581261/tesla-lfp-battery-nearly-half-deliveries/>.

in quanto tali batterie sono fondamentali per i modelli *entry-level* più economici di Tesla.

Di seguito, le tipologie di batterie Tesla:

- Tipo 1865 (18 mm di diametro e 65 mm di altezza)

utilizzo: Roadster (originale), Model S, Model X;

- Tipo 2170 (21 mm di diametro e 70 mm di altezza)

utilizzo: Modello 3, Modello Y;

- Tipo 4680 (46 mm di diametro e 80 mm di altezza)

uso: Modello Y Made-in-Texas (in futuro anche Modello Y dalla Germania e nuovi modelli);

- Prismatico (LFP)

utilizzo: Standard Range di modello 3 e modello Y²⁹.

- Chimica delle celle della batteria

Come anticipato a inizio paragrafo, sebbene tutte le batterie impiegate da Tesla siano agli ioni di litio, presentano differenze significative.

I tre principali tipi di catodo nei veicoli elettrici Tesla:

- nickel-cobalto-alluminio (NCA)
- nickel-cobalto-manganese (NCM)
- fosfato di ferro e litio (LFP).

Le prime due tipologie, NCA e NCM, si distinguono per un'elevata densità energetica, rendendole particolarmente adatte alle versioni a lunga autonomia dei veicoli Tesla. Entrambe vengono utilizzate in celle cilindriche: le NCA nei formati 1865 e 2170, fornite da Panasonic, mentre le NCM nel formato 2170 e prodotte da LG Energy Solution³⁰. Le celle LFP, invece, hanno una densità energetica inferiore, ma si caratterizzano per l'assenza di nickel e cobalto, riducendo i costi. Per questa ragione, rappresentano la soluzione ideale per i modelli *entry-level* più accessibili.

²⁹ Clemens, K. (2021, October 28). Seismic shift: Tesla will move to LFP batteries for some Model Y and Model 3 EVs. *BatteryTech Online*. <https://www.batterytechonline.com/materials/seismic-shift-tesla-will-move-to-lfp-batteries-for-some-model-y-and-model-3-evs>.

³⁰ Kane, M. (2022, May 23). A look at batteries Tesla is using in its electric cars. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/587455/batteries-tesla-using-electric-cars/>.

Nel recente Rapporto di Impatto 2021, Tesla afferma che: “continuerà a portare avanti una strategia di catodi diversificati per catodi LFP, ricchi di nickel e manganese, per affrontare vari segmenti di mercato per i veicoli e i prodotti di stoccaggio dell’energia e per fornire una flessibilità futura basata sulla disponibilità e sul prezzo delle materie prime”³¹.

Tesla punta a incrementare il contenuto di nickel e a ridurre quello di cobalto nelle batterie NCA e NCM, con l’obiettivo di abbattere i costi e migliorare la densità energetica e l’autonomia. Tuttavia, l’eliminazione del cobalto risulta complessa, poiché svolge un ruolo cruciale nella sicurezza e nella durata della batteria. Le batterie LFP, prive sia di nickel che di cobalto, risultano più economiche e sicure, ma hanno una densità energetica inferiore, influenzando l’efficienza complessiva e riducendo l’autonomia del veicolo. Nonostante ciò, la tecnologia di queste batterie è in continua evoluzione e viene impiegata principalmente nei modelli di fascia più bassa e a minor autonomia³².

È opportuno notare che le riserve di litio, cobalto e nickel negli Stati Uniti sono trascurabili. Pertanto, la produzione di veicoli elettrici si basa su questi metalli importati, uno scenario simile a quello europeo³³.

³¹ Tesla, Inc. (2021). Tesla impact report 2021. *Tesla*. https://www.tesla.com/ns_videos/2021-tesla-impact-report.pdf.

³² Lambert, F. (2022, April 22). Tesla is already using cobalt-free LFP batteries in half of its new cars produced. *Electrek*. <https://electrek.co/2022/04/22/tesla-using-cobalt-free-lfp-batteries-in-half-new-cars-produced/>.

³³ Suman, F. (2023, April 4). *Litio, terre rare e cobalto: tre minerali critici. Il Bo Live UniPD*. <https://ilbolive.unipd.it/it/news/litio-terre-rare-cobalto-tre-minerali-critici>.

Capitolo 2

Studio

Come visto nel precedente capitolo viviamo in un mondo che sta cambiando rapidamente al centro del quale vi è la transizione verso un futuro più sostenibile. I veicoli elettrici giocano un ruolo fondamentale in questo contesto, in cui Tesla risulta essere senza dubbio uno dei *leader* più influenti. Il valore delle sue azioni non solo riflette il successo dell'azienda, ma rappresenta anche un indicatore significativo del progresso verso un'economia più sostenibile. Comprendere i fattori che ne influenzano il titolo azionario risulta quindi essere fondamentale per analisti, investitori e tutti coloro che guardano con interesse alla transizione energetica.

In questo capitolo verranno introdotte le motivazioni e gli obiettivi alla base di questo studio, con il successivo obiettivo di analizzare le dinamiche economiche e finanziarie che legano il valore delle azioni di Tesla ai principali fattori esterni considerati.

Successivamente, verranno definite ed esposte le variabili chiave prese in esame, selezionate in virtù del loro impatto strategico sul settore dei veicoli a batteria elettrica.

2.1. Motivazioni e obiettivi dello studio

Con l'accelerazione verso un futuro a basse emissioni di carbonio, la domanda di veicoli elettrici è in crescita continua. Tesla, in quanto *leader* del settore, rappresenta un esempio chiave per comprendere le dinamiche economiche e finanziarie legate a tale transizione. La produzione di BEV è strettamente legata ai prezzi delle materie prime come litio, cobalto e nickel che, come visto precedentemente, costituiscono componenti essenziali delle batterie.

La limitata disponibilità di riserve di questi metalli negli Stati Uniti rende la produzione di veicoli elettrici fortemente dipendente dalle importazioni. Questa dipendenza dalle catene di approvvigionamento globali, spesso concentrate in specifiche regioni del mondo, espone Tesla a rischi geopolitici, economici e logistici. Analizzare i prezzi di questi metalli è quindi essenziale per comprendere come eventuali *shock* di volatilità e nelle catene di fornitura possano influire sui costi di produzione e, di conseguenza, sui margini di profitto e il valore delle azioni.

Le variazioni dei prezzi di questi metalli, come evidenziato in uno studio condotto nel 2019, incidono direttamente sui costi di produzione dei veicoli a batteria elettrica, influenzandone la competitività sul mercato globale³⁴.

Essendo Tesla un'azienda altamente innovativa e costantemente impegnata nella ricerca di nuove soluzioni per ridurre la dipendenza da questi metalli, studiare come le fluttuazioni dei prezzi di tali materie prime influenzino il prezzo delle sue azioni è fondamentale anche per valutare l'impatto che l'innovazione e le strategie sostenibili hanno sulla percezione del mercato e sulla competitività dell'azienda.

Verificare i legami tra il valore delle materie prime e le azioni di Tesla potrebbe aiutarci a comprendere anche l'interconnessione tra diversi settori economici, come quello energetico e minerario, che sono influenzati anch'essi dall'adozione di tecnologie sostenibili.

Jung Youn Mo e Wooyoung Jeon nel 2018 hanno constatato che la domanda di veicoli elettrici influisce positivamente nelle dinamiche di breve periodo riguardo ai prezzi di litio e cobalto. Tuttavia, hanno anche dimostrato che uno *shock* della domanda di veicoli elettrici sui prezzi di litio, manganese e nickel ha un impatto relativamente piccolo nel lungo periodo³⁵. Attraverso queste considerazioni è possibile che il titolo Tesla possa essere influenzato nel lungo periodo dal prezzo del Cobalto, mentre gli altri metalli possono rappresentare fattori non significativi nello spiegarne l'andamento.

Nonostante il declino dell'utilizzo di combustibili fossili nel settore dei trasporti su strada, il prezzo del petrolio continua a rivestire un ruolo cruciale nell'economia globale. Le fluttuazioni del suo prezzo possono influenzare direttamente i costi di produzione e distribuzione, trasporto e logistica nonché la percezione dei consumatori rispetto ai BEV, aumentando la domanda per queste soluzioni in risposta a *shock* nei prezzi dei carburanti fossili. Questo effetto potrebbe indirettamente impattare il valore azionario di Tesla. La scelta del prezzo del petrolio come variabile è inoltre supportata

³⁴ Leader, A., Gaustad, G., & Babbitt, C. (2019). The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 8(2). <https://doi.org/10.1007/s40243-019-0146-z>.

³⁵ Mo, J. Y., & Jeon, W. (2018). The impact of electric vehicle demand and battery recycling on price dynamics of lithium-ion battery cathode materials: A Vector Error Correction Model (VECM) analysis. *Sustainability*, 10(8), 2870. <https://doi.org/10.3390/su10082870>.

da numerosi studi che hanno più volte confermato la co-movenza con il settore dei veicoli elettrici³⁶.

Alla luce di tali osservazioni, l'obiettivo diviene rispondere alle seguenti domande:

- Il prezzo del titolo Tesla, del petrolio e dei materiali costitutivi delle batterie delle auto elettriche co-muovono ed esiste una relazione di lungo termine?
- Petrolio e materiali costitutivi delle batterie delle macchine elettriche sono in grado di contribuire alla crescita del titolo Tesla?
- In che misura gli *shock* dei prezzi del petrolio e dei metalli influenzano il valore azionario di Tesla nel breve periodo? Quanto tempo impiega il mercato a correggere queste fluttuazioni?

2.2. Scelta dei dati

L'identificazione delle variabili è stata effettuata tenendo conto della loro rilevanza economica e finanziaria rispetto alle motivazioni e gli obiettivi dello studio. Di conseguenza, per catturare le forze economiche che possono influenzare il titolo azionario di Tesla, sono state selezionate variabili che giocano un ruolo cruciale nella produzione dei veicoli a batteria elettrica e nella competitività del settore.

Le serie storiche analizzate sono state rilevate con frequenza giornaliera, per un totale di 1712 osservazioni che vanno dal 22/05/2017 al 29/08/2024. Tale granularità è stata scelta per osservare con precisione le dinamiche temporali di lungo periodo e le fluttuazioni di breve termine dovute all'alta volatilità o *shock* di mercato.

In linea con le motivazioni espresse, sono state selezionate le seguenti variabili per l'analisi: il prezzo di chiusura delle azioni Tesla, i prezzi di chiusura delle materie prime chiave per la produzione delle batterie elettriche – carbonato di litio, cobalto e nickel – e il prezzo di chiusura del Brent Oil. L'analisi è stata poi ampliata per includere l'oro raffinato, poiché riveste un ruolo strategico non solo come indicatore macroeconomico, ma anche come componente chiave nei processi industriali legati ai veicoli elettrici e alle batterie.

³⁶ Tong, P. (2023). Analysis of influencing factors in the new energy automobile industry based on linear regression models. *Advances in Economics, Business and Management Research* (pp. 720–730). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-098-5_82.

Tutti e le variabili sono espresse in dollari americani (USD).

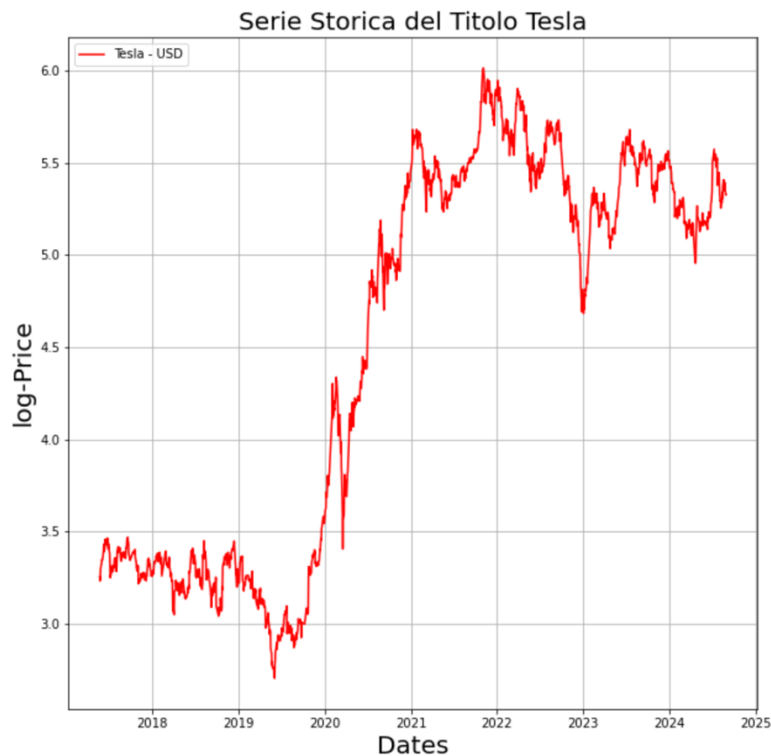
Ogni variabile sarà ora presentata e giustificata in dettaglio.

- *Tesla*

La variabile principale dell'analisi riguarda il prezzo delle azioni di Tesla, che non solo rispecchia il successo aziendale ma anche l'aspettativa di *performance* futura in un contesto di continua evoluzione, inclusi gli sviluppi inerenti alle materie prime necessarie per la produzione dei veicoli elettrici.

Il *dataset* è disponibile e scaricabile al seguente link:

<https://tradingeconomics.com/tsla:us>.

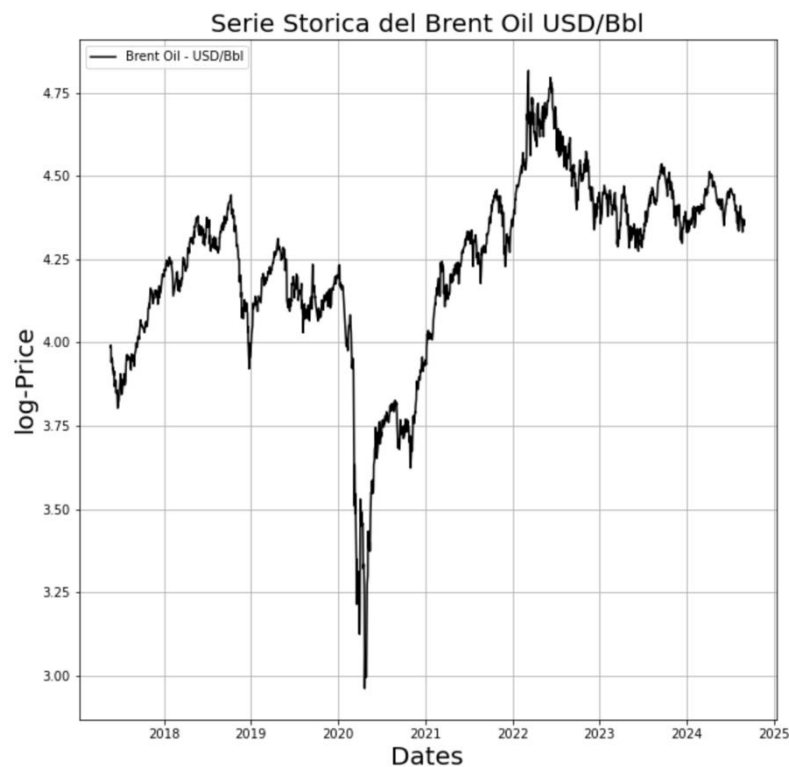


Come si evince dal nostro grafico, il prezzo delle azioni presenta una notevole volatilità, la quale potrebbe essere influenzata non solo dai risultati aziendali correnti ed attesi, ma anche dalle fluttuazioni dei costi relativi all'approvvigionamento delle materie prime strategiche.

Il prezzo delle azioni di Tesla è stato dunque scelto come variabile dipendente del nostro modello, che verrà introdotto nel prossimo capitolo, con l'obiettivo di individuare relazioni di lungo periodo e aggiustamenti nel breve termine rispetto alle altre variabili considerate, attraverso l'applicazione di un *Vector Error Correction Model*.

- *Brent Oil*

La seconda variabile considerata in questo studio è il prezzo del *Brent Oil*, una qualità di petrolio estratta principalmente nel Mare del Nord e utilizzata come *benchmark* internazionale per la determinazione dei prezzi petroliferi, rappresentando un indicatore significativo delle condizioni del mercato energetico globale³⁷. Il suo valore viene espresso in dollari per barile.



Il prezzo del *Brent* assume particolare rilevanza in relazione ai veicoli elettrici: come accennato precedentemente, da un lato prezzi elevati del petrolio possono favorire la transizione energetica e la domanda di veicoli a batteria elettrica come quelli prodotti da

³⁷ Wittner, M. (2020, September). Brent: the world's crude benchmark. *ICE*.
<https://www.ice.com/insights/market-pulse/brent-the-worlds-crude-benchmark>.

Tesla; dall'altro, esso potrebbe incidere indirettamente sui costi di produzione e logistica, influenzando indirettamente i margini dell'azienda. Per questi motivi, la scelta del prezzo del *Brent* è giustificata come variabile indipendente del modello.

La serie storica del *Brent Oil* utilizzata per questa analisi è disponibile al seguente link:

<https://tradingeconomics.com/commodity/brent-crude-oil>.

- *Carbonato di litio, cobalto, nickel e oro raffinato*

Oltre al prezzo del Brent Oil, questo studio prende in considerazione come variabili indipendenti un insieme di materie prime strategiche utilizzate nella produzione di veicoli elettrici, in particolare delle batterie. Essendo componenti essenziali dei BEV, il loro prezzo potrebbe avere un impatto significativo sui costi di produzione e sul valore delle azioni di aziende produttrici di veicoli a batteria elettrica, come Tesla.

I *dataset* di nickel e oro raffinato sono stati scaricati al seguente link:

<https://www.kaggle.com/datasets/naveennas/metals-price-historical-data-mcx-data-7-metals?select=Aluminium+Historical+Data.csv>.

Ad eccezione dell'oro, il cui prezzo è riferito al grammo, i prezzi delle materie prime analizzate sono stati standardizzati su base chilogrammo per garantire uniformità e comparabilità tra le variabili prese in esame in quanto, originariamente, i prezzi erano espressi in unità di misura differenti.

- *Carbonato di litio*: è l'elemento essenziale per la produzione delle batterie agli ioni di litio utilizzate nei veicoli elettrici.

L'analisi del prezzo del carbonato di litio come variabile indipendente è cruciale per comprendere l'impatto sui costi di produzione dei veicoli elettrici e sul valore delle azioni di Tesla.



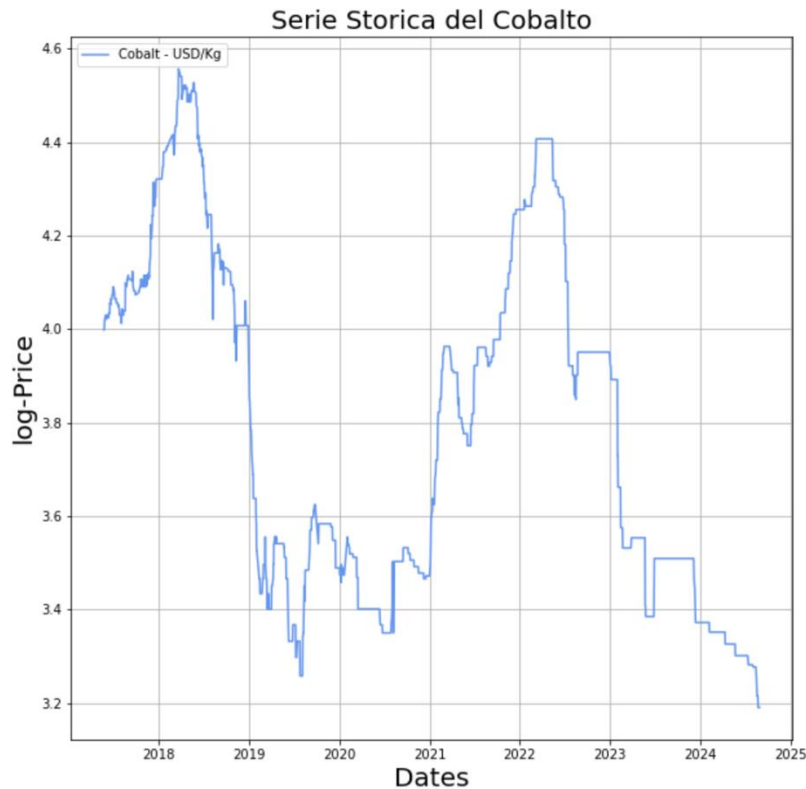
Ad esempio, un aumento dei prezzi del litio può portare a costi di produzione più elevati, riducendo i margini di profitto delle aziende produttrici di veicoli elettrici. Al contrario, un calo del prezzo, per ipotesi dovuto alla scoperta di nuovi giacimenti, potrebbe migliorare la redditività di Tesla e favorire l'adozione su larga scala dei veicoli elettrici.

Il *dataset* completo, i cui prezzi erano espressi in Yuan Cinesi (CNY) per tonnellata, è scaricabile al seguente link:

<https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>.

- *Cobalto*: come precedentemente osservato, il cobalto è un materiale molto importante per il catodo utilizzato nelle batterie NCA (nickel-cobalto-alluminio) e NCM (nickel-cobalto-manganese) di Tesla, essenziale per la stabilità e l'aumento della densità energetica delle batterie. Vi è tuttavia un tentativo di riduzione dell'utilizzo di cobalto da parte dell'azienda tramite le nuove batterie di tipologia LFP (fosfato di litio e ferro), con l'obiettivo di ridurre la dipendenza

da questo materiale, il quale ha un prezzo molto elevato dovuto alla sua scarsità, come possiamo osservare dal relativo grafico.

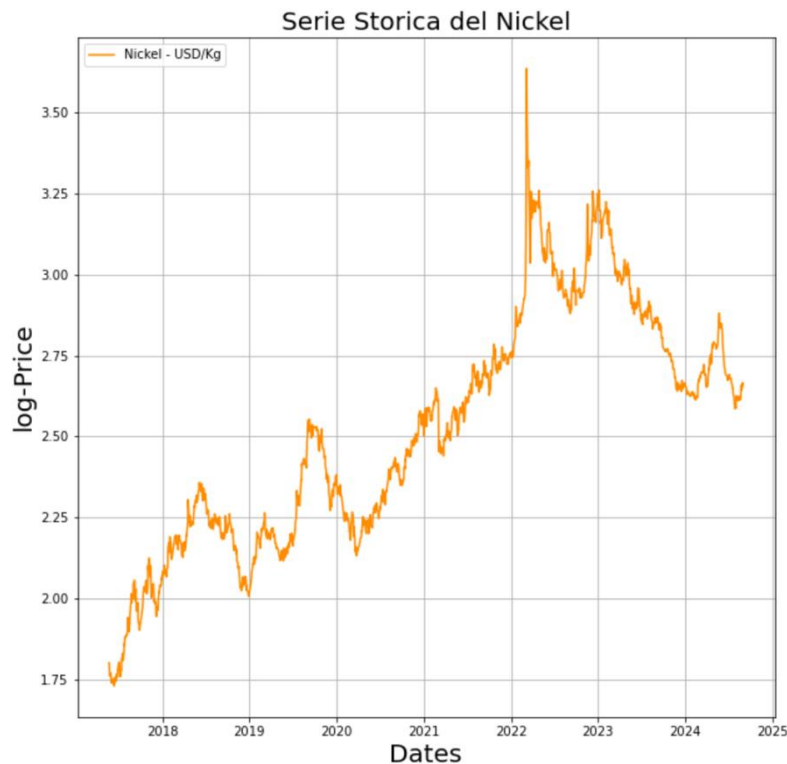


Ovviamente, anche il prezzo del cobalto impatta sui costi di produzione.

In questo contesto, la sua inclusione come variabile indipendente nel modello di analisi consentirebbe di misurare il grado di indipendenza che Tesla ha raggiunto rispetto a tale materia prima.

Il *dataset* completo, espresso in Dollari Americani (USD) su tonnellata, è disponibile al seguente link: <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>.

- *Nickel*: come visto precedentemente, è uno dei componenti fondamentali nei catodi delle batterie NCA e NCM ampiamente utilizzate nei veicoli Tesla e nel settore in generale. Svolge un ruolo essenziale nell'aumentare la capacità di stoccaggio energetico della batteria, migliorando l'autonomia.



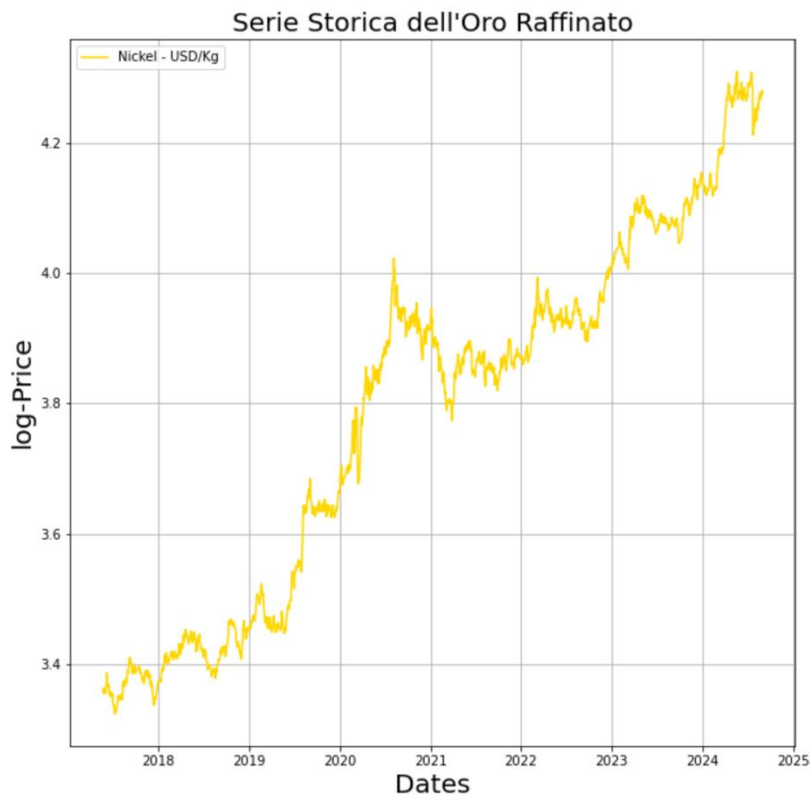
Rispetto al cobalto, il nickel è più abbondante ed economico, il che consente alle aziende di poter sviluppare batterie con una percentuale sempre maggiore di questa materia prima nei catodi.

La probabile dipendenza di Tesla dal nickel, come parte della strategia per ridurre l'uso del cobalto, rende questa materia prima particolarmente rilevante per l'azienda. Pertanto, fluttuazioni del suo prezzo potrebbero impattare sul valore delle sue azioni, motivo per cui è stata scelta come ultima variabile indipendente.

- *Oro Raffinato*: anche se il suo impiego nel settore automobilistico non è paragonabile a quello di altre materie prime come quelle viste in precedenza, l'oro è spesso componente essenziale di microchip e altri sistemi elettronici, cuore tecnologico dei BEV. Inoltre, pur non avendo un utilizzo diretto nella produzione delle batterie per questa tipologia di veicoli, è considerato un indicatore macroeconomico significativo, spesso utilizzato come bene rifugio in periodi di instabilità. Le sue fluttuazioni possono quindi riflettere non solo le

tendenze del settore, ma anche le dinamiche di mercato globali che potrebbero influenzare indirettamente l'industria automobilistica a zero emissioni. I rialzi del prezzo dell'oro potrebbero coincidere con un aumento della percezione del rischio da parte degli investitori portando a movimenti di capitali verso *asset* più sicuri a scapito di titoli azionari tecnologici come Tesla, caratterizzati da una maggiore volatilità.

Di seguito un grafico relativo all'ultima variabile indipendente selezionata.



Capitolo 3

Analisi Empirica con VECM

In questo capitolo verrà esaminato come le variabili indipendenti selezionate per lo studio, introdotte nel Capitolo 2, influenzino il valore delle azioni di Tesla, con particolare attenzione alla distinzione tra le dinamiche di lungo periodo e i processi di aggiustamento che si verificano nel breve termine a seguito di variazioni nei prezzi o *shock* di mercato.

A tale scopo, verrà utilizzato un *Vector Error Correction Model* (VECM), un modello econometrico che consente di analizzare sistemi di variabili cointegrate, ossia variabili che risultano legate da un equilibrio di lungo periodo pur presentando possibili deviazioni temporanee.

L'analisi si focalizzerà sull'identificazione dei meccanismi di aggiustamento che intervengono in risposta a tali deviazioni e sulle implicazioni economiche dei risultati ottenuti, tentando di fornire una comprensione più approfondita delle dinamiche che governano il valore delle azioni di Tesla.

Abbiamo scelto di utilizzare i logaritmi delle variabili per rendere le serie temporali più stabili in termini di varianza e facilitare l'interpretazione economica. In questo modo, i coefficienti stimati possono essere interpretati come elasticità, ossia variazioni percentuali, rendendo i risultati più intuitivi e facilmente comprensibili.

Il capitolo sarà organizzato in sezioni dedicate alla descrizione del modello e ai risultati dell'analisi.

3.1. Concetti preliminari: Non Stazionarietà e Stazionarietà

L'applicazione di un modello d'analisi corretto richiede dapprima la comprensione delle proprietà della serie storica soggetta allo studio. Queste proprietà si riferiscono al concetto di stazionarietà statistica³⁸, utile nella modellizzazione delle serie storiche in quanto un processo stazionario implica il ripetersi dei dati nel tempo, facilitando le previsioni.

³⁸ Leorato, S. (2012). Stazionarietà statistica - Enciclopedia - Treccani. *Treccani*.
https://www.treccani.it/enciclopedia/stazionarieta-statistica_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/.

La stazionarietà forte in senso stretto vuole che la distribuzione congiunta della serie storica sia invariante rispetto a traslazioni (*shift*) temporali:

$$F_x(\mathbf{x}_{t1}, \mathbf{x}_{t2}, \dots, \mathbf{x}_{tn}) = F_x(\mathbf{x}_{t1+s}, \mathbf{x}_{t2+s}, \dots, \mathbf{x}_{tn+s}) \quad \forall t \neq s$$

In altri termini, le proprietà statistiche della serie devono essere invarianti rispetto al variare del tempo. Questo è tuttavia un concetto molto restrittivo e difficilmente osservabile all'interno dei mercati finanziari, caratterizzati in *primis* da fluttuazioni, talvolta giornaliere, del valore dei prezzi.

Nel contesto finanziario vi è quindi preferita la definizione di stazionarietà debole. Per debole si intende che il concetto di stazionarietà viene circoscritto solamente di primi due momenti della distribuzione (media e varianza), e che la covarianza del processo sia funzione della distanza tra gli istanti temporali in cui essa è calcolata:

$$\begin{aligned} E[X_t] &= \mu < \infty & \forall t \\ V(X_t) &= \sigma^2 < \infty & \forall t \\ Cov(X_t, X_s) &= Cov(X_{t+h}, X_{s+h}) = \gamma(|t - s|) \end{aligned}$$

Media e varianza risultano quindi essere finite e non indicizzate rispetto al tempo, dunque costanti, facilitando l'analisi.

Tuttavia, a seconda del tipo di dati scelto, anche la proprietà di stazionarietà debole non è sempre rispettata ed in questo caso si parla di serie storica non stazionaria. Questa tipologia di serie storiche mostra media e varianza che variano con lo scorrere del tempo, con possibili evidenze di *trend* ed eventi ciclici o stagionali.

Un esempio di serie storiche non-stazionarie è dato dai prezzi di titoli e materie prime, come verificheremo più avanti. Queste serie possono essere tuttavia modellate rifacendosi all'utilizzo dell'operatore differenza, rendendo dunque tali serie stazionarie:

$$\Delta^i = (1 - L)^i \quad \text{Operatore Differenza}$$

L'elevazione alla potenza di Δ^i definisce l'ordine di integrazione della serie, ovvero quante volte tale serie non stazionaria necessita di essere integrata per essere resa

stazionaria. Il parametro L è definito *lag operator*, quest'ultimo può essere applicato ai *lags* delle variabili considerate per “riportale” al tempo attuale, dunque:

$$L^i y_t = y_{t-i}$$

Ad esempio:

$$\Delta y_t^{TESLA} = y_t^{TESLA} - y_{t-1}^{TESLA} \quad \text{Serie Integrata di Ordine 1 – I(1)}$$

Prima di applicare il *Vector Error Correction Model* è essenziale verificare se le serie storiche delle variabili scelte per lo studio siano tutte non stazionarie a livello e abbiano lo stesso ordine di integrazione, in seguito all'applicazione dell'operatore differenza. A tal fine, si utilizzano test statistici appropriati, tra i quali troviamo l'*Augmented Dickey-Fuller (ADF)* test.

- *Augmented Dickey-Fuller Test*

L'ADF è un test statistico utilizzato per determinare se una serie sia non stazionaria o stazionaria. Come si verifica? Per capirlo, dobbiamo prendere in considerazione un Modello Autoregressivo di Ordine 1³⁹.

$$\text{AR(1): } y_t = \phi_0 + \phi_1 y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \forall t \quad \text{dove: } t = 1, 2, \dots, T$$

Il coefficiente ϕ_1 rappresenta l'effetto del valore passato della serie (y_{t-1}) sul valore attuale (y_t), ed è detto coefficiente di persistenza. Il termine ε_t rappresenta il termine di errore al tempo t , e si assume generalmente che: $\varepsilon_t \sim iid(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

Se il parametro $\phi_1 = 1$, la serie contiene una radice unitaria, il che significa che non è stazionaria e segue un *random walk*.

³⁹ Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (p. 84). Oxford University Press.

L'*Augmented Dickey-Fuller* si basa proprio su questa struttura per testare l'ipotesi nulla (H_0) secondo cui la serie ha una radice unitaria⁴⁰.

$$H_0: |\phi_1| = 1$$

$$H_1: |\phi_1| < 1$$

Se l'ipotesi nulla viene rifiutata, si conclude che la serie è stazionaria. Al contrario, se non si può rifiutare l'ipotesi nulla, ciò suggerisce che la serie segue un processo non stazionario.

Per facilitare il test possiamo riscrivere il processo nella seguente forma:

$$\begin{aligned} y_t &= \phi_0 + \phi_1 y_{t-1} + \varepsilon_t \\ y_t - y_{t-1} &= \phi_0 + \phi_1 y_{t-1} - y_{t-1} + \varepsilon_t \\ \Delta y_t &= \phi_0 + (\phi_1 - 1) * y_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned}$$

Ricaviamo dunque:

$$\Delta y_t = \phi_0 + \beta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{dove: } \beta = (\phi_1 - 1)$$

Questa è la versione *Dickey-Fuller* (con costante ϕ_0) del test di non stazionarietà, le cui nuove ipotesi saranno:

$$H_0: |\beta| = 0 \quad \text{la serie ha radice unitaria}$$

$$H_1: |\beta| \neq 0 \quad \text{la serie non ha radice unitaria}$$

Stimati i valori dei coefficienti del modello, possiamo calcolare la statistica t per il coefficiente β stimato e confrontarla con i valori critici della distribuzione *Dickey-Fuller*. In alternativa, possiamo guardare al *p-value*. Se il *p-value* è maggiore di un certo livello di significatività scelto (α , ad esempio 0.05), non ci sono prove sufficienti all'interno del nostro campione per rifiutare l'ipotesi nulla, e concludiamo che la serie è

⁴⁰ Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). *Financial econometric modeling* (pp. 120–126). Oxford University Press.

probabilmente non stazionaria. Al contrario, se il *p-value* è inferiore o uguale ad α , abbiamo prove sufficienti per rifiutare H_0 e concludere che la serie è stazionaria.

$$\begin{array}{ll} p\text{-value} > \alpha & \text{non rigetto } H_0 \\ p\text{-value} \leq \alpha & \text{rigetto } H_0 \end{array}$$

Tuttavia, con il *Dickey-Fuller* può esservi il problema che i residui della regressione di cui sopra possano essere autocorrelati, distorcendo il test. Per tali motivi possiamo utilizzare l'*Augmented Dickey-Fuller* (ADF), il quale aggiunge la seguente sommatoria alla nostra regressione, migliorando l'affidabilità del test rispetto al DF originale:

$$\sum_{i=1}^p \phi_i \Delta y_{t-i}$$

Questa sommatoria rappresenta i termini di ritardo delle differenze della serie temporale, in cui “*p*” indica il numero di ritardi (*lags*) da considerare nel modello. Otteniamo dunque la seguente equazione:

$$\Delta y_t = \phi_0 + \beta y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad \text{ADF con costante}$$

La selezione del numero di *lags* è cruciale per il corretto funzionamento del modello, in quanto utilizzando pochi ritardi si corre il rischio che alcuni aspetti dinamici possano non venire catturati. Al contrario, se il numero di *lags* è eccessivo la problematica è di incorrere in una riduzione della precisione nella stima dei parametri.

Per determinare il numero ottimale di *lags*, si ricorre generalmente a criteri statistici oggettivi, noti come criteri di informazione (*information criteria*)⁴¹.

Tra i criteri più utilizzati troviamo:

$$1. \text{ Akaike Information Criterion (AIC)} = \log(\widehat{\sigma_\varepsilon^2}) + \frac{2pk^2}{T}$$

⁴¹ Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 96–97). Oxford University Press.

$$2. \text{ Bayesian Information Criterion (BIC)} = \log(\widehat{\sigma}_{\varepsilon}^2) + \frac{\log(T)pk^2}{T}$$

$$3. \text{ Final Prediction Error (FPE)} = \widehat{\sigma}_{\varepsilon}^2 * \left(\frac{T+pk^2}{T-pk^2} \right)$$

$$4. \text{ Hannan-Quinn Information Criterion (HQIC)} = \log(\widehat{\sigma}_{\varepsilon}^2) + \frac{2\log(\log(T))pk^2}{T}$$

In queste espressioni $\widehat{\sigma}_{\varepsilon}^2$ rappresenta la varianza stimata dei residui del modello, una misura dell'errore commesso nella previsione dei valori osservati. Minore è il valore di questa varianza, migliore è l'adattamento del modello ai dati. Gli altri parametri "T", "p" e "k" indicano rispettivamente la lunghezza del campione, il numero massimo di ritardi considerati nel modello e il numero di coefficienti stimati per ogni equazione. Quest'ultimi vengono utilizzati per creare dei parametri di penalizzazione.

Fornite queste premesse, abbiamo applicato il test ADF per verificare la non stazionarietà delle variabili nel nostro campione.

I risultati del test sui prezzi di chiusura di Tesla, Brent Oil e delle materie prime per le batterie mostrano che tutte le serie non sono stazionarie a livello, con *p-value* di molto superiori al livello di significatività del 5% (Figura 7).

Successivamente, per confermarne l'ordine di integrazione, abbiamo differenziato le variabili al fine di ottenerne le differenze prime. Il test ADF applicato alle serie differenziate ha fornito risultati promettenti, confermando che tutte le variabili sono stazionarie dopo una prima differenziazione (Figura 8).

Figura 7 - Test ADF su variabili a livello

VAR Order Selection (* highlights the minimums)				
	AIC	BIC	FPE	HQIC
0	-15.37	-15.35	2.119e-07	-15.36
1	-47.64	-47.50*	2.046e-21	-47.59
2	-47.74	-47.50	1.840e-21	-47.65*
3	-47.78	-47.41	1.781e-21	-47.64
4	-47.78	-47.30	1.784e-21	-47.60
5	-47.81*	-47.21	1.731e-21*	-47.59
6	-47.79	-47.08	1.766e-21	-47.52
7	-47.78	-46.96	1.769e-21	-47.48
8	-47.77	-46.83	1.798e-21	-47.42
9	-47.76	-46.71	1.812e-21	-47.37
10	-47.75	-46.58	1.835e-21	-47.31
Lag ottimale (AIC ed FPE): 5				
	Variabile	Statistic ADF	P-Value	Lags
0	Closing Price Tesla	-1.095742	0.716767	0 \
1	Closing Price Brent Oil USD/Bbl	-2.088034	0.249353	0
2	Closing Price Lithium Carbonate	-0.824583	0.811794	5
3	Closing Price Cobalt	-0.864930	0.799302	5
4	Closing Price Nickel	-2.081140	0.252166	4
5	Closing Price Refined Gold	-0.390872	0.911612	4
Osservazioni	Valore Critico 1%	Valore Critico 5%	Valore Critico 10%	
0	1711	-3.434178	-2.863231	-2.567670
1	1711	-3.434178	-2.863231	-2.567670
2	1706	-3.434189	-2.863236	-2.567673
3	1706	-3.434189	-2.863236	-2.567673
4	1707	-3.434187	-2.863235	-2.567672
5	1707	-3.434187	-2.863235	-2.567672
Conclusione				
0	Non Stazionaria			
1	Non Stazionaria			
2	Non Stazionaria			
3	Non Stazionaria			
4	Non Stazionaria			
5	Non Stazionaria			

Figura 8 - Test ADF su variabili differenziate

VAR Order Selection (* highlights the minimums)

	AIC	BIC	FPE	HQIC
0	-47.57	-47.55	2.201e-21	-47.56
1	-47.71	-47.58*	1.896e-21	-47.66
2	-47.76	-47.51	1.816e-21	-47.67*
3	-47.76	-47.40	1.808e-21	-47.63
4	-47.80*	-47.32	1.744e-21*	-47.62
5	-47.78	-47.18	1.777e-21	-47.56
6	-47.78	-47.07	1.778e-21	-47.52
7	-47.76	-46.94	1.808e-21	-47.46
8	-47.76	-46.82	1.819e-21	-47.41
9	-47.75	-46.69	1.837e-21	-47.36
10	-47.74	-46.57	1.844e-21	-47.31

Lag ottimale (AIC ed FPE): 4

	Variabile	Statistic ADF	P-Value	Lags
0	Closing Price Tesla	-40.675233	0.000000e+00	0 \
1	Closing Price Brent Oil USD/Bbl	-42.715863	0.000000e+00	0
2	Closing Price Lithium Carbonate	-10.563328	7.628297e-19	4
3	Closing Price Cobalt	-14.846161	1.805984e-27	4
4	Closing Price Nickel	-22.410069	0.000000e+00	3
5	Closing Price Refined Gold	-20.372290	0.000000e+00	3

	Osservazioni	Valore Critico 1%	Valore Critico 5%	Valore Critico 10%
0	1710	-3.434180	-2.863232	-2.567671
1	1710	-3.434180	-2.863232	-2.567671
2	1706	-3.434189	-2.863236	-2.567673
3	1706	-3.434189	-2.863236	-2.567673
4	1707	-3.434187	-2.863235	-2.567672
5	1707	-3.434187	-2.863235	-2.567672

Conclusione

0	Stazionaria
1	Stazionaria
2	Stazionaria
3	Stazionaria
4	Stazionaria
5	Stazionaria

Poiché tutti i prezzi di chiusura sono stati confermati come variabili integrate di ordine 1, possiamo ora introdurre il *Vector Error Correction Model* (VECM), soddisfacendo il primo prerequisito necessario per la sua applicazione.

3.2. Introduzione al Vector Error Correction Model

Il VECM è un modello econometrico particolarmente utile quando le variabili in esame sono cointegrate, ovvero quando esiste una relazione stabile di lungo periodo tra di esse, nonostante le fluttuazioni di breve termine. Quando le variabili sono cointegrate, il VECM consente di interpretare sia le dinamiche di lungo periodo che gli aggiustamenti di breve termine che si manifestano in risposta a *shocks* esterni. In altre parole, è uno strumento utile per capire come queste deviazioni temporanee vengano corrette nel tempo, riportando il sistema al suo equilibrio di lungo termine.

Nei capitoli precedenti è stato delineato il contesto economico e tecnologico in cui opera Tesla. Sono state individuate le materie prime essenziali per la produzione di batterie elettriche e il Brent Oil come elementi chiave in grado di influenzare non solo i costi di produzione, ma anche le aspettative di mercato e, in ultima analisi, il valore delle azioni.

L'obiettivo di questa sezione, dopo un'introduzione del modello, è dunque analizzare se e in che modo il prezzo delle azioni Tesla è influenzato dalle fluttuazioni delle variabili indipendenti selezionate.

Utilizzando il VECM potremo valutare:

1. Le dinamiche di lungo periodo, che mostrano come le variabili si muovono insieme nel tempo;
2. La reattività del prezzo delle azioni di Tesla agli *shocks* nel breve termine e i meccanismi attraverso cui questi squilibri vengono corretti.

Per ogni singola variabile y_i , il VECM può essere espresso in forma scalare come segue⁴²:

⁴² Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 143–146). Oxford University Press.

$$\Delta y_{i,t} = \delta_i + \alpha_i u_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{i,j} \Delta y_{i,t-j} + \varepsilon_{i,t} \quad \text{dove: } \varepsilon_t \sim WN(\mathbf{0}, \sigma_\varepsilon^2)$$

In questo modello, δ_i rappresenta l'intercetta dell'equazione per l' i -esima variabile.

Il termine u_{t-1} , noto come errore di cointegrazione, misura la deviazione dall'equilibrio di lungo periodo al tempo $t-1$, cioè la differenza tra il valore effettivo della variabile e il valore previsto dalla relazione di lungo termine con le altre variabili nel sistema. È definito come:

$$u_{t-1} = y_{1,t-1} - \beta_0 - \beta_2 y_{2,t-1} - \dots - \beta_N y_{N,t-1}$$

Quando $u_{t-1} = \mathbf{0}$ le variabili rispettano la relazione di equilibrio. Al contrario, se $u_{t-1} \neq \mathbf{0}$ vi è uno squilibrio che il sistema cercherà di correggere nel tempo, in quanto le variabili sono cointegrate.

Il coefficiente α_i misura la velocità di aggiustamento della variabile y_i , indicando quanto rapidamente la variabile si riallinea all'equilibrio di lungo periodo in risposta alle deviazioni passate. I termini Γ_{ij} catturano l'effetto delle variazioni passate della i -esima variabile sui suoi valori correnti. Più precisamente, ogni Γ_{ij} indica l'influenza che la variazione della variabile y_i al lag " j " ($\Delta y_{i,t-j}$) ha sul valore corrente della variabile stessa.

Infine, $\varepsilon_{i,t}$ rappresenta l'errore specifico dell' i -esima equazione, che include gli effetti non spiegabili dal modello, ossia le fluttuazioni impreviste che influenzano la variabile y_i al tempo t .

Quando si analizzano sistemi con più variabili cointegrate, risulta conveniente esprimere il modello in forma matriciale:

$$\Delta Y_t = \delta + \Pi Y_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t-j} + \varepsilon_t \quad \text{dove: } \varepsilon_t \sim WN(\mathbf{0}, \Omega)$$

I termini sono definiti come segue:

- ΔY_t : vettore colonna ($N \times 1$) delle variazioni delle variabili endogene rispetto al periodo precedente;
- δ : vettore delle intercette di dimensione $N \times 1$;

- $\Pi = \alpha\beta'$: matrice di cointegrazione ($N \times N$)⁴³ che contiene:
 - α : matrice dei coefficienti di aggiustamento ($N \times r$; dove r è il rango di Π);
 - β : matrice contenente i coefficienti di cointegrazione ($N \times r$; dove r è il rango di Π);
- Y_{t-1} : vettore delle variabili a livello al tempo $t-1$ di dimensione $N \times 1$;
- Γ_j : matrice ($N \times N$) dei coefficienti delle variazioni ritardate al lag “ j ”, che catturano gli effetti dinamici nel breve periodo;
- ε_t : vettore degli errori residui ($N \times 1$). Si assume generalmente che siano distribuiti come $\varepsilon_t \sim WN(0, \Omega)$, dove Ω è la matrice di covarianza, con errori non correlati tra loro né con i regressori del modello, e caratterizzati da varianza e covarianza costanti nel tempo.

Notiamo che nel caso matriciale, l'errore di cointegrazione è rappresentato come $u_{t-1} = \beta'Y_{t-1}$. In sostanza, ΠY_{t-1} rappresenta il termine di correzione dell'errore, dove $\beta'Y_{t-1}$ cattura le deviazioni dell'equilibrio di lungo periodo e α ne determina la velocità di aggiustamento.

Risulta ora chiaro che, prima di applicare correttamente il VECM, è necessario verificare l'esistenza di una relazione di equilibrio tra le variabili considerate.

3.2.1. Cointegrazione e Test di Johansen

Come accennato brevemente in precedenza, la cointegrazione è un concetto fondamentale nell'analisi delle serie storiche, in particolare quando si analizzano variabili economiche che possono essere non stazionarie a livello ma che condividono una relazione stabile nel lungo termine⁴⁴.

Se due o più serie temporali sono integrate dello stesso ordine, come nel nostro caso, potrebbero essere cointegrate se esiste una combinazione lineare delle stesse che risulti stazionaria⁴⁵.

⁴³ Johansen, S. (1995). Likelihood-based inference in cointegrated vector autoregressive models. *Oxford University Press*.

⁴⁴ Peracchi, F. (2012). Cointegrazione - Enciclopedia - Treccani. *Treccani*.

[https://www.treccani.it/enciclopedia/cointegrazione_\(Dizionario-di-Economia-e-Finanza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/cointegrazione_(Dizionario-di-Economia-e-Finanza)/).

⁴⁵ Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (p. 138). *Oxford University Press*.

Per verificare la presenza di cointegrazione tra più di due variabili, il test di Johansen rappresenta uno degli approcci più utilizzati.

Nel *Trace test* di Johansen, il rango (r) della matrice Π determina il numero di relazioni di cointegrazione. In base ai risultati, possiamo avere diverse conclusioni⁴⁶:

$r = 0$: non c'è cointegrazione

$0 < r < N$: esistono “ r ” relazioni di cointegrazione

$r = N$: tutte le variabili sono stazionarie

La statistica è calcolata come segue:

$$TRACE = -(T - k) \sum_{i=r+1}^N \log(1 - \hat{\lambda}_i) \quad \text{dove: } i = 1, 2, \dots, N$$

I termini $\hat{\lambda}_i$ della statistica *trace* sono gli autovalori stimati della matrice Π , ordinati in ordine decrescente.

Il test segue una procedura iterativa:

1. si parte con l'ipotesi nulla $H_0: r = 0$ (nessuna cointegrazione);
2. si calcola la statistica del *Trace test*;
3. si confrontano i valori del *Trace test* con i valori critici specifici per il test di Johansen;
4. se la statistica *Trace* supera il valore critico, si rifiuta H_0 e si aumenta r ;
5. il processo termina quando i valori del *Trace test* diventano inferiori al valore critico, indicando che il rango r corrisponde al numero di relazioni cointegranti.

Per quel che ne concerne la nostra analisi, abbiamo applicato il test di Johansen per verificare se vi sia o meno la presenza di relazioni stabili a lungo termine tra le nostre variabili.

⁴⁶ Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 157-159). Oxford University Press.

Per l'applicazione del test, abbiamo prima determinato il numero di *lags* da includere nel modello secondo i criteri d'informazione discussi in precedenza. I risultati della selezione sono mostrati nella Figura 9.

Figura 9 - Selezione lags ottimali con Information Criteria

VECM Order Selection (* highlights the minimums)				
	AIC	BIC	FPE	HQIC
0	-47.63	-47.49*	2.068e-21	-47.58
1	-47.73	-47.48	1.860e-21	-47.64*
2	-47.77	-47.40	1.800e-21	-47.63
3	-47.76	-47.28	1.803e-21	-47.59
4	-47.79*	-47.20	1.750e-21*	-47.57
5	-47.77	-47.06	1.785e-21	-47.51
6	-47.77	-46.95	1.788e-21	-47.47
7	-47.76	-46.81	1.817e-21	-47.41
8	-47.75	-46.69	1.832e-21	-47.36
9	-47.74	-46.56	1.855e-21	-47.30
10	-47.73	-46.44	1.866e-21	-47.25
11	-47.72	-46.32	1.883e-21	-47.20
12	-47.71	-46.19	1.904e-21	-47.15
13	-47.70	-46.06	1.931e-21	-47.09
14	-47.70	-45.95	1.932e-21	-47.05
15	-47.68	-45.82	1.963e-21	-46.99

Per ogni criterio si ha un numero accompagnato da * che indica il numero di *lags* ottimali. In particolare, i criteri AIC e FPE suggeriscono l'inclusione di 4 *lags* nel modello, mentre i criteri BIC e HQIC suggeriscono rispettivamente 0 e 1 *lag*.

AIC e FPE tendono a selezionare un numero maggiore di *lags* per catturare più dinamiche di breve periodo, ma questo può portare a un modello eccessivamente complesso aumentando il numero di parametri da stimare e riducendo l'efficienza delle stime. Al contrario, il BIC è più restrittivo e tende a sottostimare il numero ottimale di ritardi. HQIC si pone come un compromesso tra questi approcci, bilanciando la necessità di includere un numero sufficiente di ritardi senza appesantire troppo il modello.

Per queste motivazioni, scegliamo di utilizzare 1 *lag*, in linea con quanto suggerito da HQIC.

A seguito della selezione dei ritardi, abbiamo proceduto con il test di Johansen. La statistica *Trace* ottenuta al primo test è risultata pari a 116.8, un valore superiore al valore critico di 83.94, con un livello di significatività del 5%. Pertanto, possiamo rifiutare l'ipotesi nulla di assenza di cointegrazione. Aumentando l'ipotesi nulla H_0 a $r=1$, il valore della statistica *Trace* ottenuta risulta ora inferiore al valore critico, come dimostra la Figura 10.

Figura 10 - Test di Cointegrazione di Johansen con Trace Test

=====			
r_0	r_1	test statistic	critical value

0	6	116.8	83.94
1	6	41.05	60.06

1			

In conclusione, i risultati del test indicano che l'ordine di cointegrazione è pari a 1, confermando la presenza di una relazione stabile tra le variabili prese in esame e l'esistenza di un equilibrio a lungo termine tra di esse, nonostante possibili fluttuazioni di breve periodo.

Con l'identificazione delle variabili integrate di ordine 1 e la conferma della loro cointegrazione, abbiamo ora tutti i prerequisiti necessari per costruire correttamente il *Vector Error Correction Model*.

3.3. Configurazione e Applicazione del Modello

Siamo giunti al cuore della nostra analisi.

Riassumendo brevemente, il modello VECM applicato al nostro caso di studio include un totale di 6 variabili endogene ($N=6$), precedentemente introdotte nel Capitolo 2.

Il numero di ritardi da considerare è stato fissato a 1 secondo quanto suggerito dal criterio d'informazione HQIC ($p=1$), come mostrato in precedenza nella Figura 9. Ciò implica che le variazioni delle variabili endogene sono considerate fino a un periodo (giorno) precedente, permettendo di catturare le dinamiche di breve termine.

Ricordiamo che il rango di cointegrazione, determinato in base al *Trace* test di Johansen, ha restituito l'esistenza di un unico equilibrio economico stabile che lega le variabili considerate nel lungo termine ($r=1$). In termini pratici, ciò implica che le matrici α e β siano entrambe di dimensione 6×1 , ovvero dei vettori.

Completata la configurazione del modello, nel prossimo paragrafo verranno presentati i risultati dell'analisi empirica. Sarà fornita un'interpretazione economica dei risultati, con particolare attenzione alle relazioni tra il titolo Tesla e le variabili economiche selezionate. L'obiettivo principale è comprendere il ruolo strategico dei prezzi del Brent e delle principali materie prime impiegate nella produzione di batterie elettriche, valutando come le variazioni di queste variabili possano avere un impatto significativo sulle fluttuazioni del valore azionario del titolo considerato.

3.3.1. Risultati dell'Analisi Empirica

L'applicazione del modello VECM è stata effettuata in Python. Il *dataset* include le variabili economiche chiave evidenziate nel Capitolo 2.

I risultati consentono di analizzare le relazioni di lungo periodo e le dinamiche di breve termine all'interno del sistema economico considerato. Sono suddivisi in due principali categorie: le relazioni di lungo periodo, rappresentate dai coefficienti di cointegrazione β , e le dinamiche di breve periodo descritte dai coefficienti di aggiustamento α .

Entrambi i gruppi di risultati saranno illustrati attraverso tabelle che evidenziano i valori dei coefficienti stimati dal modello e la loro significatività statistica, offrendo una solida base per le successive interpretazioni economiche.

Un coefficiente è considerato significativo quando il suo *p-value* risulta inferiore al livello di confidenza stabilito (5% in questo caso), e l'intervallo di confidenza non comprende lo zero.

~Coefficienti di Cointegrazione

La Figura 11 riporta i coefficienti di cointegrazione stimati, che descrivono la natura e l'intensità delle relazioni di equilibrio di lungo periodo tra il valore azionario di Tesla e le variabili economiche considerate.

Ci focalizzeremo su:

- Direzione e segno dei coefficienti, che indicano relazioni positive o negative con la variabile dipendente (il prezzo delle azioni Tesla);
- Significatività statistica, che verrà valutata attraverso i *p-value* e gli intervalli di confidenza.

Figura 11 - Coefficienti di Cointegrazione Stimati

Cointegration relations for loading-coefficients-column 1						
	coef	std err	z	P> z 	[0.025	0.975]
beta.1	1.0000	0	0	0.000	1.000	1.000
beta.2	-0.0317	0.358	-0.089	0.929	-0.732	0.669
beta.3	-0.4018	0.170	-2.358	0.018	-0.736	-0.068
beta.4	1.0782	0.229	4.718	0.000	0.630	1.526
beta.5	-0.9526	0.458	-2.082	0.037	-1.850	-0.056
beta.6	-1.3357	0.380	-3.517	0.000	-2.080	-0.591

Dai risultati emerge un quadro complesso, in cui alcune variabili si rivelano fondamentali nel determinare il valore delle azioni Tesla, mentre altre mostrano una relazione più marginale o non significativa.

Ricordando che la forma generale della cointegrazione è data da:

$$\beta'Y_t = u_t$$

Scritta in modo esplicito, l'equazione diventa:

$$\beta_1 P_{Tesla,t} + \beta_2 P_{Brent,t} + \beta_3 P_{Litio,t} + \dots + \beta_6 P_{Oro,t} = u_t$$

Il prezzo delle azioni Tesla è rappresentato dal coefficiente β_1 , fissato a 1 per normalizzazione. Questo valore non ha un significato economico, ma funge da riferimento per interpretare le relazioni delle altre variabili indipendenti con l'andamento del titolo nel lungo periodo. Possiamo infatti effettuare la riformulazione della relazione in funzione del prezzo di Tesla:

$$P_{Tesla,t} = -\beta_2 P_{Brent,t} - \beta_3 P_{Litio,t} - \dots - \beta_6 P_{Oro,t} + u_t$$

Quest'ultima riformulazione mostra chiaramente come il prezzo di Tesla sia determinato, nel lungo periodo, dalle altre variabili nel sistema più un termine di errore che rappresenta le deviazioni momentanee dall'equilibrio, il quale si assume abbia media 0. Nel nostro caso specifico la relazione è quindi data da:

$$P_{Tesla,t} = 0.0317P_{Brent,t} + 0.4018P_{Litio,t} - 1.0782P_{Cobalto,t} + 0.9526P_{Nickel,t} + 1.3357P_{Oro,t} + u_t$$

Analizziamo ora nel dettaglio i coefficienti stimati per ciascuna variabile.

Il coefficiente β_2 stimato per il prezzo del Brent Oil è 0.0317. Secondo le formulazioni appena discusse, un aumento dell'1% del prezzo del Brent potrebbe essere seguito un aumento del prezzo delle azioni di Tesla dello 0.03%. Tuttavia, il *p-value* associato, pari a 0.929, è ben superiore alla soglia del 5%, indicando che la relazione non è statisticamente significativa. Questo suggerisce che il prezzo del Brent non ha un impatto robusto sul valore delle azioni di Tesla nel lungo periodo, ed è ulteriormente confermato dal fatto che l'intervallo di confidenza include il valore zero. Come affermato nel Capitolo 2, ci saremmo aspettati una relazione positiva tra il prezzo del Brent e le azioni di Tesla, questo perché da un punto di vista teorico, un aumento del

prezzo del petrolio dovrebbe favorire la competitività dei veicoli elettrici, rendendoli economicamente più attraenti rispetto ai veicoli con motore a scoppio. Questo scenario favorirebbe Tesla, migliorando le sue prospettive di mercato e, quindi, il valore delle sue azioni. Tuttavia, la non significatività del coefficiente potrebbe riflettere l'impatto di fattori economici più complessi: ad esempio, nei mercati emergenti, un aumento del prezzo del petrolio potrebbe spingere i consumatori verso veicoli elettrici più economici, come quelli prodotti dalla principale *competitor* BYD, creando una pressione competitiva per Tesla. O ancora, l'aumento del Brent potrebbe essere percepito dai mercati come un indicatore di pressione inflazionistica, influenzando negativamente i mercati azionari⁴⁷. In questi casi, la relazione osservata deriverebbe da un impatto macroeconomico più ampio piuttosto che da una relazione diretta tra le variabili considerate. Infine, queste stime potrebbero riflettere il fatto che Tesla ha ormai raggiunto una posizione di *leadership* nel mercato EV, e nel lungo termine il suo successo potrebbe dipendere sempre meno dalle dinamiche dei prezzi dei combustibili fossili e più da fattori interni, come l'innovazione tecnologica e la gestione strategica delle materie prime.

Per il carbonato di litio, il coefficiente β_3 stimato è 0.4018, con un *p-value* di 0.018. Questo risultato indica che esiste una relazione positiva e significativa tra il suo prezzo e il valore delle azioni Tesla. Da un punto di vista statistico anche l'intervallo di confidenza, che esclude lo zero, conferma la stabilità della stima, implicando che il valore del litio ha un impatto diretto e rilevante nel lungo periodo. Tuttavia, questa relazione, pur discostandosi dalle aspettative iniziali presentate nel Capitolo 2, potrebbe essere spiegata alla luce di dinamiche economiche più ampie che caratterizzano il mercato dei veicoli elettrici e delle materie prime. L'aumento del prezzo del litio, ad esempio, potrebbe essere interpretato dagli investitori come un segnale di espansione del mercato BEV. In questo contesto, Tesla, in quanto *leader* del settore, potrebbe essere vista come la principale beneficiaria della crescita, con un possibile impatto positivo sulla fiducia degli investitori e sul valore del titolo, contribuendo a spiegare il segno positivo del coefficiente. Inoltre, l'aumento del prezzo del litio può rappresentare una sfida maggiore per i *competitor* più piccoli, che potrebbero subire un aumento dei

⁴⁷ Pictet Asset Management. (2024, August). Petrolio e inflazione: come sono collegati. <https://am.pictet.com/pictetperte/mercati-e-investimenti/2024/petrolio-e-inflazione-come-sono-collegati>.

costi di produzione e una riduzione della competitività. Tesla, al contrario, potrebbe essere meno esposta a questi rischi grazie alle sue economie di scala, innovazioni tecnologiche e contratti di fornitura a lungo termine, che ridurrebbero la propria esposizione alle variazioni di prezzo⁴⁸. Di conseguenza, un aumento del prezzo del litio può rafforzare la posizione di Tesla rispetto ai concorrenti, consolidando la percezione positiva degli investitori, suggerendo che il prezzo del litio, piuttosto che un semplice costo per l'azienda, possa riflettere anche segnali di crescita e consolidamento del mercato dei veicoli elettrici.

Il coefficiente stimato per il prezzo del cobalto (β_4) è pari a -1.0782, con un *p-value* prossimo allo zero. Anche l'intervallo di confidenza associato esclude lo zero, a conferma della robustezza della stima e dell'esistenza di una relazione negativa stabile con il prezzo delle azioni Tesla nel lungo periodo. Questo risultato suggerisce che l'aumento del prezzo del cobalto di un punto percentuale è associato a una diminuzione del valore delle azioni di Tesla dell'1,08% circa. Questa relazione negativa è coerente con i risultati attesi discussi nel Capitolo 2. Come visto precedentemente, il cobalto è una delle materie prime più importanti utilizzate nei catodi delle batterie NCA ed NCM, il cui costo è elevato e la disponibilità limitata. Tesla è direttamente esposta ai costi del cobalto, il cui aumento dei prezzi si traduce in un incremento diretto dei costi di produzione che, se non trasferito ai consumatori, rappresenta una pressione significativa sui margini di profitto dell'azienda, influenzando negativamente la percezione degli investitori. Nonostante Tesla stia ampliando l'uso delle batterie LFP, che non richiedono cobalto, il coefficiente negativo indica che questa transizione non ha ancora ridotto in modo significativo la dipendenza dell'azienda da questa materia prima. L'esposizione alle variazioni di prezzo del cobalto rimane quindi un fattore rilevante, segnalando che, almeno nel periodo analizzato, le batterie NCA ed NCM continuano a giocare un ruolo centrale nei costi di produzione di Tesla.

Per quel che ne concerne il nickel, il coefficiente stimato β_5 risulta essere 0.9526, il che implica che un aumento dell'1% del suo prezzo sia associato un incremento dello 0.95% del valore delle azioni Tesla nel lungo periodo. L'analisi statistica conferma la

⁴⁸ Belloro, M. (2023, August 2). Litio per batterie: Tesla rinnova con la cinese Yahua fino al 2030. *FormulaPassion.it*. <https://www.formulapassion.it/automoto/elettriche/litio-per-batterie-tesla-rinnova-con-la-cinese-yahua-fino-al-2030>.

significatività di questa relazione, con un p -value di 0.037, che la rende statisticamente rilevante al livello convenzionale del 5%. Inoltre, l'intervallo di confidenza esclude lo zero, suggerendo ulteriormente che il legame potrebbe essere stabile nel lungo termine. Come visto in precedenza, il nickel è una materia prima fondamentale per i catodi delle batterie NCA ed NCM, entrambe ampiamente utilizzate da Tesla. Anche qui, uno dei fattori chiave che potrebbe spiegare il segno positivo del coefficiente è che un aumento del suo prezzo può essere visto dagli investitori come un segnale di espansione della domanda di batterie avanzate e, di conseguenza, della crescita del mercato BEV. Inoltre, Tesla potrebbe aver ridotto progressivamente la dipendenza da questo metallo attraverso alternative come le batterie FLP. Un'altra possibile spiegazione potrebbe derivare dalla capacità di Tesla di gestire in modo efficace l'approvvigionamento e i costi del nickel rispetto ai suoi concorrenti, attraverso contratti di fornitura a lungo termine, garantendosi un accesso stabile alla materia prima e riducendone la volatilità dei costi⁴⁹. Questo vantaggio competitivo potrebbe tradursi in una maggiore solidità finanziaria rispetto agli altri produttori di BEV, rafforzando ulteriormente il valore del titolo. Tuttavia, è importante considerare che il prezzo del nickel è influenzato anche da fattori macroeconomici, come l'andamento dell'industria siderurgica, in cui il metallo è ampiamente impiegato nella produzione di acciaio inossidabile. Se l'aumento del prezzo fosse principalmente determinato da fattori esterni al settore BEV, l'impatto positivo sulle azioni Tesla potrebbe essere meno legato alla domanda di batterie e più influenzato da dinamiche macroeconomiche generali. Tuttavia, la significatività statistica del coefficiente suggerisce che, almeno in parte, l'andamento del prezzo del nickel è percepito dagli investitori come un segnale di crescita per il settore dei veicoli elettrici.

Infine, il coefficiente β_6 stimato per il prezzo dell'oro raffinato risulta pari a 1.3357, con un p -value prossimo allo zero, indicando che questa relazione è altamente significativa. Anche l'intervallo di confidenza indica che vi sia un legame stabile tra le due variabili nel lungo periodo, data l'esclusione dello zero. L'aspettativa iniziale era che un aumento del prezzo dell'oro potesse riflettere una maggiore avversione al rischio da parte degli investitori, portando a una riallocazione dei capitali verso *asset* più sicuri

⁴⁹ Talon Metals Corp. (2022, January 10). Tesla and Talon Metals enter into supply agreement for nickel. Talon Metals Corp. <https://talonmetals.com/tesla-and-talon-metals-enter-into-supply-agreement-for-nickel/>.

e penalizzando titoli ad alta crescita e con elevata volatilità come Tesla. Una possibile spiegazione per questo risultato controverso è che il prezzo dell'oro non rifletta solo la percezione del rischio sui mercati finanziari, ma anche un ambiente di liquidità in espansione associato a politiche monetarie accomodanti. Ad esempio, nei periodi in cui le banche centrali mantengono i tassi d'interesse bassi, sia l'oro che i titoli *growth*, come Tesla, potrebbero beneficiarne, poiché il costo del capitale è ridotto e gli investitori cercano *asset* con maggiore potenziale di rendimento⁵⁰. Un'altra possibilità è che l'andamento del prezzo dell'oro possa essere interpretato dai mercati come un indicatore delle condizioni economiche globali; dunque, se il suo prezzo aumenta in un periodo di forte crescita economica ciò potrebbe coincidere con una fase espansiva per il settore dei veicoli elettrici, sostenendo anche il titolo di Tesla. Resta quindi fondamentale considerare che questa connessione potrebbe essere influenzata da molteplici fattori macroeconomici, tra cui la politica monetaria. Di conseguenza è importante sottolineare che il legame osservato potrebbe riflettere non solo un rapporto diretto, ma dinamiche più complesse.

~Coefficienti di Aggiustamento

Dopo aver analizzato l'impatto delle variabili indipendenti sul prezzo delle azioni Tesla nel lungo periodo attraverso i coefficienti di cointegrazione, è ora fondamentale esaminare il ruolo dei coefficienti di aggiustamento α . Come detto, tale coefficiente indica la velocità con cui una variabile risponde a uno *shock* rispetto alla relazione di cointegrazione. È possibile riscontrare:

- $\alpha < 0$: la variabile contribuisce a riportare il sistema verso l'equilibrio, correggendo eventuali deviazioni. La grandezza in valore assoluto del coefficiente indica la velocità di questo aggiustamento;
- $\alpha > 0$: invece di attenuare le variazioni, la variabile tende ad amplificarle, allontanandosi ulteriormente dall'equilibrio anziché correggersi.

⁵⁰ WisdomTree. (2022, November). Gold foundation paper. *WisdomTree*. <https://www.wisdomtree.eu/-/media/eu-media-files/other-documents/foundation-papers/gold-foundation-paper.pdf>.

Ora, esamineremo i coefficienti di aggiustamento stimati, fornendo un'interpretazione statistica ed economica per comprendere il ruolo che ciascuna variabile gioca nel processo di ritorno all'equilibrio di lungo periodo. Di seguito le tabelle con le relative stime.

Figura 12 - Coefficienti di Aggiustamento Stimati

Loading coefficients (alpha) for equation Closing Price Tesla						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ec1	-0.0020	0.002	-1.307	0.191	-0.005	0.001
Loading coefficients (alpha) for equation Closing Price Brent Oil USD/Bbl						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ec1	0.0014	0.001	1.344	0.179	-0.001	0.003
Loading coefficients (alpha) for equation Closing Price Lithium Carbonate						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ec1	0.0036	0.000	7.629	0.000	0.003	0.004
Loading coefficients (alpha) for equation Closing Price Cobalt						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ec1	0.0019	0.001	3.019	0.003	0.001	0.003
Loading coefficients (alpha) for equation Closing Price Nickel						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ec1	0.0011	0.001	1.329	0.184	-0.001	0.003
Loading coefficients (alpha) for equation Closing Price Refined Gold						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ec1	-0.0007	0.000	-2.080	0.038	-0.001	-3.83e-05

Partendo dall'analisi del coefficiente α_1 , relativo al prezzo di Tesla, il valore stimato è pari a -0.0020 con un *p-value* di 0.191. Questo suggerisce che, sebbene l'aggiustamento verso l'equilibrio sia teoricamente presente, la velocità di correzione è molto bassa e statisticamente non significativa. Pertanto, in caso di una deviazione dall'equilibrio di lungo periodo, non possiamo affermare con certezza che il prezzo delle azioni Tesla

reagisca in modo immediato o significativo. Questo comportamento potrebbe riflettere il fatto che il titolo è influenzato da numerosi fattori esogeni, alcuni dei quali potrebbero avere un impatto predominante rispetto alle relazioni con le materie prime discusse in analisi.

Per il Brent Oil, il coefficiente α_2 stimato è pari a 0.0014, con un *p-value* di 0.179, indicando che il suo contributo all'aggiustamento non è statisticamente significativo. Questo risultato suggerisce che il prezzo del Brent non svolge un ruolo attivo nel riequilibrio verso la relazione di cointegrazione. Dal punto di vista economico, ciò potrebbe riflettere il fatto che il petrolio, pur essendo teoricamente legato al settore dei veicoli elettrici, non influenza direttamente e in maniera significativa le azioni di Tesla, sempre più indipendente dalle dinamiche che caratterizzano i prezzi dei combustibili fossili.

Nel caso del litio e del cobalto, i loro coefficienti di aggiustamento risultano positivi, rispettivamente $\alpha_3 = 0.0036$ per il litio e $\alpha_4 = 0.0019$ per il cobalto. Inoltre, entrambi sono statisticamente significativi. Questo indica che, invece di contribuire al ritorno verso l'equilibrio, questi due metalli tendono a seguire la direzione della variazione stessa, contribuendo all'amplificazione del disallineamento. Un possibile motivo di questo comportamento potrebbe essere legato alla loro natura di materie prime fondamentali per il settore delle batterie, che le rende fortemente influenzate dalle dinamiche del mercato EV. Ad esempio, se il prezzo delle azioni Tesla subisce una variazione significativa, è plausibile che ciò rifletta un cambiamento nelle aspettative degli investitori sull'intero settore dei veicoli elettrici, con un conseguente impatto sui prezzi del litio e del cobalto nella stessa direzione.

Anche il coefficiente di aggiustamento relativo al nickel ($\alpha_5=0.0011$) è positivo, ma non significativo. Sebbene il coefficiente di cointegrazione sia positivo e significativo, indicando una relazione strutturale di lungo periodo tra le due variabili considerate, il nickel non mostra un processo attivo di aggiustamento per riportare il sistema alla stabilità dopo una deviazione dall'equilibrio. Dal punto di vista economico, la domanda di nickel è dominata dall'industria dell'acciaio inossidabile⁵¹ e Tesla sta riducendo la

⁵¹ Market Research Intellect. (2024, October 2). Approfondimenti di mercato: Come ferro nickel sta alimentando le innovazioni ad acciaio inossidabile.
<https://www.marketresearchintellect.com/it/blog/market-insights-how-ferro-nickel-is-fueling-innovations-in-stainless-steel/>.

sua dipendenza con il crescente uso delle batterie LFP. Questo potrebbe aver indebolito ulteriormente il legame tra il prezzo di questa materia prima e le azioni dell'azienda. Inoltre, gli accordi di fornitura a lungo termine di Tesla potrebbero contribuire a stabilizzare i costi, attenuando l'impatto delle fluttuazioni del prezzo del nickel sulle *performance* della società.

Infine, l'oro raffinato è l'unica variabile tra quelle analizzate che mostra un coefficiente di aggiustamento negativo e statisticamente significativo, suggerendo che gioca un ruolo attivo nel riportare il sistema verso l'equilibrio. Tuttavia, la sua velocità di aggiustamento è estremamente lenta $\alpha_9 = -0.0007$, indicando che non reagisce immediatamente ma si adatta gradualmente nel tempo. Questo risultato potrebbe confermare che l'oro agisce più come un indicatore macroeconomico piuttosto che come variabile direttamente connessa alle dinamiche di Tesla. Probabilmente, contribuisce all'aggiustamento perché riflette condizioni macroeconomiche più ampie che indirettamente influenzano l'azienda, come la liquidità nei mercati e le politiche monetarie, ma non risulta strettamente legato alle dinamiche industriali della società. In sintesi, Tesla potrebbe mostrare una tendenza a correggere gli squilibri, ma con un ritmo piuttosto lento e non statisticamente significativo, mentre le materie prime maggiormente legate al settore delle batterie, come litio e cobalto, sembrano amplificare le variazioni piuttosto che stabilizzarle. D'altra parte, solo l'oro raffinato appare come un fattore di stabilizzazione, ma con un processo molto graduale e probabilmente dovuto al suo ruolo di *asset* macroeconomico più che di *commodity* direttamente legata a Tesla.

3.4. Analisi Dinamica: Impulse Response Function e Causalità di Granger

- *Impulse Response Functions*

Per analizzare più a fondo le dinamiche temporali delle relazioni stimate, è utile ricorrere a strumenti in grado di valutare come il sistema reagisce a *shock* esogeni. In particolare, le *Impulse Response Function* (IRF) consentono di osservare la reazione del prezzo delle azioni Tesla a variazioni improvvise nel prezzo delle materie prime considerate. Inoltre, permettono di verificare se gli effetti di questi *shock* siano

temporanei o persistano nel tempo, fornendo così indicazioni utili sulla stabilità delle relazioni individuate⁵².

Le IRF possono essere derivate dal modello VECM sfruttando la *Wald Representation*. Quest'ultima, permette di esprimere il sistema in una rappresentazione *Moving Average* infinita (MA_{∞}), ottenuta dalla trasformazione di un modello VAR(p).

Per semplicità dell'esposizione, assumiamo un VECM(1) senza costante:

$$\Delta Y_t = \Pi Y_{t-1} + \varepsilon_t$$

Poiché tale modello è espresso in termini di differenze prime, possiamo riscriverlo in livelli attraverso la definizione stessa di Y_t .

$$Y_t = Y_{t-1} + \Delta Y_t$$

Sapendo che $\Delta Y_t = \Pi Y_{t-1} + \varepsilon_t$, possiamo sostituire, ottenendo:

$$Y_t = Y_{t-1} + \Pi Y_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$Y_t = (I + \Pi)Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{da cui:}$$

$$\textbf{Modello VAR(1):} \quad Y_t = \Phi Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{dove: } \Phi = I + \Pi$$

Tecnicamente, questo processo è stazionario se tutti gli autovalori della matrice Φ (di dimensione $N \times N$) sono minori di 1:

$$\textit{eig}(\Phi) < 1 \quad \textit{Condizione di Stazionarietà}$$

Ricordiamo che se il processo è stazionario, allora si assume che venga rispettato in ogni istante temporale, quindi sarà vero che:

$$Y_{t-1} = \Phi Y_{t-2} + \varepsilon_{t-1}$$

⁵² Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 99–103). Oxford University Press.

$$Y_t = \Phi(\Phi Y_{t-2} + \varepsilon_{t-1}) + \varepsilon_t$$

$$Y_t = \Phi^2 Y_{t-2} + \Phi \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

Continuando ad iterare all'infinito otteniamo:

$$Y_t = \Phi^h Y_{t-h} + \sum_{i=0}^{\infty} \Phi^i \varepsilon_{t-i}$$

Notiamo che se il processo è stazionario, allora per $\lim_{h \rightarrow \infty} \Phi^h Y_{t-h} = \mathbf{0}$, dunque:

$$Y_t = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi^i \varepsilon_{t-i} \quad \text{Wald Representation MA}(\infty)$$

Possiamo quindi esprimere tale modello come una forma infinita di *shock* passati opportunamente pesati per le matrici Φ elevate a “i”. Questa rappresentazione mostra come ogni *shock* influenzi il sistema in modo graduale con effetti decrescenti, data la stazionarietà. Si assume inoltre che $\varepsilon_t \sim WN(\mathbf{0}, \Omega)$. Se la matrice $\Omega = E[\varepsilon_t \varepsilon_t']$ è diagonale, significa che gli *shock* sono indipendenti tra loro. Il problema principale è che, in questa tipologia di modelli dinamici, gli errori possono risultare correlati, rendendo complicate e meno chiare le interpretazioni economiche.

Per tali motivazioni introduciamo la matrice G ($N \times N$), che permette di aggiungere gli effetti contemporanei alle $y_{i,t}$ e di descriverne le correlazioni. Questo ci consente di indentificare correttamente gli *shock* strutturali e ottenere una rappresentazione economica più chiara.

In questo modo, otteniamo uno *Structural Vector Autoregressive Process* (SVAR):

$$\text{Modello SVAR(1):} \quad GY_t = \Gamma Y_{t-1} + V_t \quad \text{con: } V(V_t) = D$$

Se la matrice degli effetti contemporanei G , che va opportunamente identificata, risulta invertibile, possiamo moltiplicare per l'inversa ambo i lati al fine di ottenere:

$$G^{-1}GY_t = G^{-1}\Gamma Y_{t-1} + G^{-1}V_t$$

$$I_N Y_t = G^{-1}\Gamma Y_{t-1} + G^{-1}V_t$$

$$Y_t = G^{-1}\Gamma Y_{t-1} + G^{-1}V_t$$

Definendo $\Phi = G^{-1}\Gamma$ ed $\varepsilon_t = G^{-1}V_t$ otteniamo nuovamente il modello VAR(1).

Come visto, se i nuovi autovalori della matrice $\Phi = G^{-1}\Gamma$ sono minori di 1, il processo è stazionario ed è rappresentabile come un MA(∞) strutturale:

$$Y_t = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi^i \varepsilon_{t-i}$$

In cui $\varepsilon_t \sim iid(0, G^{-1}DG^{-1'})$ ed è uguale a $\varepsilon_t = G^{-1}V_t$, dunque:

$$Y_t = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi^i G^{-1}V_{t-i}$$

In questo modo abbiamo ottenuto la *Structural MA Representation*:

$$Y_t = \sum_{i=0}^{\infty} \Theta_i V_{t-i} \quad \text{dove: } \Theta_i = \Phi^i G^{-1}$$

Questa relazione mostra come ogni *shock* strutturale influenzi il sistema nel tempo. La matrice Θ_i rappresenta la trasmissione di tali *shock* nel sistema economico ed è alla base per il calcolo delle *Impulse Response Functions*.

Ipotizzando, sempre per semplicità, $N=2$ variabili possiamo vedere tale rappresentazione come:

$$\begin{bmatrix} y_{1,t} \\ y_{2,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{11}^{(0)} & \theta_{12}^{(0)} \\ \theta_{21}^{(0)} & \theta_{22}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,t} \\ V_{2,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_{11}^{(1)} & \theta_{12}^{(1)} \\ \theta_{21}^{(1)} & \theta_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,t-1} \\ V_{2,t-1} \end{bmatrix} + \dots$$

Dato che il processo è stazionario, allora varrà anche al tempo $t+s$, implicando che:

$$\begin{bmatrix} y_{1,t+s} \\ y_{2,t+s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{11}^{(0)} & \theta_{12}^{(0)} \\ \theta_{21}^{(0)} & \theta_{22}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,t+s} \\ V_{2,t+s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_{11}^{(1)} & \theta_{12}^{(1)} \\ \theta_{21}^{(1)} & \theta_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,t+s-1} \\ V_{2,t+s-1} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} \theta_{11}^{(s)} & \theta_{12}^{(s)} \\ \theta_{21}^{(s)} & \theta_{22}^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,t} \\ V_{2,t} \end{bmatrix}$$

Le IRF definiscono quindi la risposta dinamica di una variabile endogena (i) a uno *shock* strutturale unitario esogeno (j) avvenuto al tempo t . In particolare, esse misurano

la variazione attesa della variabile y_i al tempo $t+s$ in risposta a uno *shock* esogeno $V_{j,t}$. Formalmente, esse sono definite come:

$$IRF_{kj}(s) = \frac{\partial y_{i,t+s}}{\partial V_{j,t}} = \theta_{ij}^{(s)}$$

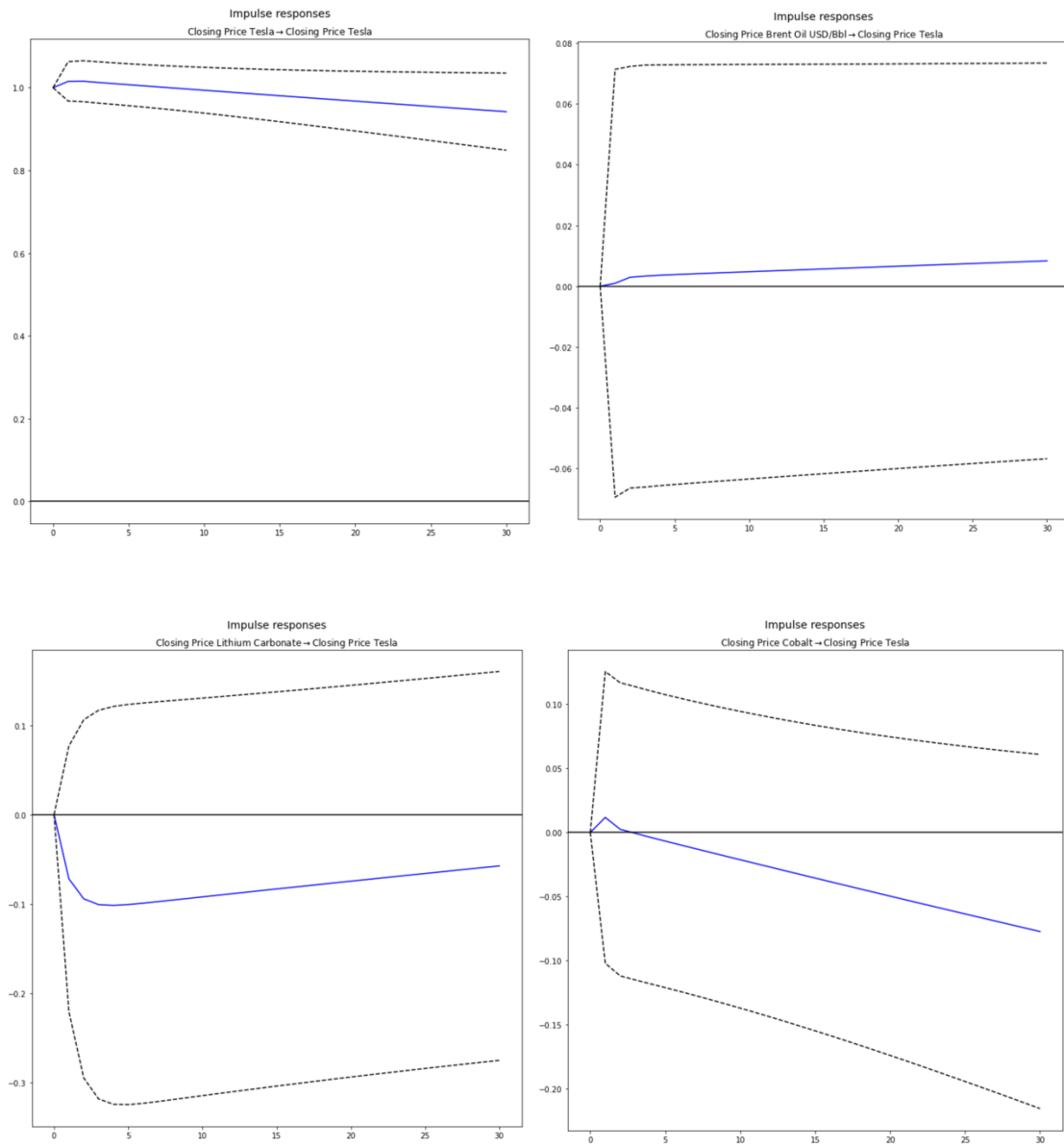
Quindi, ad esempio, attraverso il parametro $\theta_{12}^{(s)}$ possiamo capire qual è l'effetto di uno *shock* unitario su $V_{2,t}$ sulla variabile $y_{1,t+s}$. Paragonandolo al nostro caso di studio, il parametro $\theta_{12}^{(s)}$ indica quanto varia il prezzo delle azioni Tesla (y_1) in risposta a uno *shock* unitario sul Brent (V_2) avvenuto al tempo t .

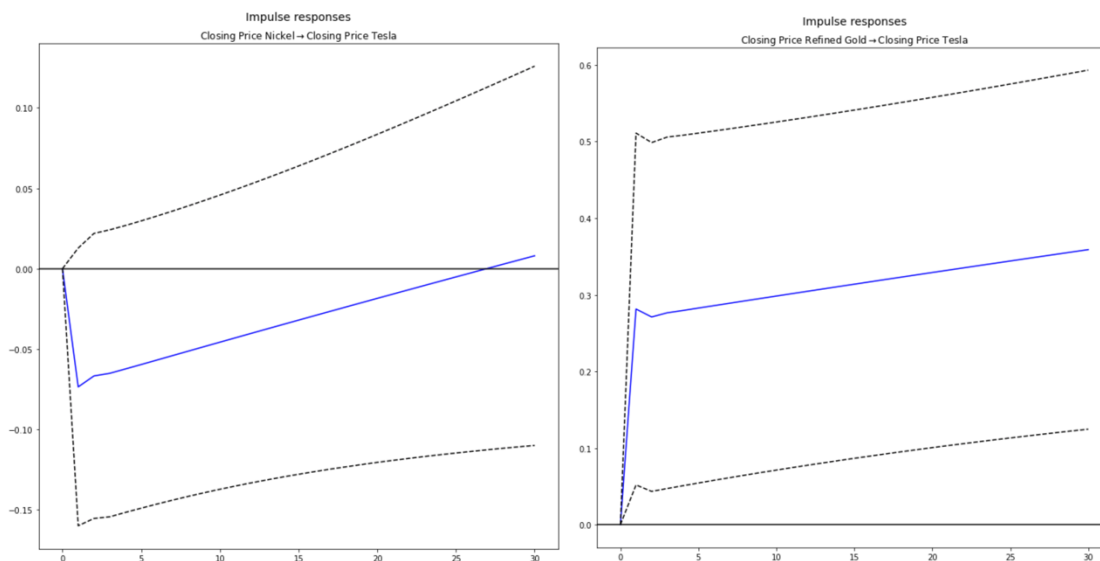
Osservando l'evoluzione di $\theta_{ij}^{(s)}$ al variare di s è possibile determinare l'entità e la durata dello *shock*. In generale, se i valori di $\theta_{ij}^{(s)}$ tendono rapidamente a zero lo *shock* ha un impatto breve; se invece persistono nel tempo, vi è un effetto duraturo sulla variabile endogena osservata.

Dopo aver illustrato la derivazione teorica delle *Impulse Response Function*, analizzeremo ora i risultati ottenuti. In particolare, esamineremo come il prezzo delle azioni Tesla risponde a *shock* esogeni nelle materie prime considerate, soffermandoci sulla loro intensità e persistenza nel tempo.

La Figura 13 seguente mostra le IRF stimate (linee blu continue), con intervalli di confidenza al 95% (linee tratteggiate) e un orizzonte temporale di 30 giorni.

Figura 13 - Impulse Response Functions Stimulate





Dall'analisi della prima IRF emerge che, a seguito di uno *shock* positivo, il prezzo delle azioni Tesla mostra una risposta immediata e positiva. L'incremento iniziale tende a stabilizzarsi rapidamente, ma la traiettoria della risposta indica che il prezzo non ritorna immediatamente al livello precedente allo *shock*, piuttosto tende a decrescere gradualmente. Questo comportamento potrebbe suggerire che il titolo presenta una componente persistente, ovvero vi è una certa inezia nei movimenti del prezzo delle azioni.

Per quanto riguarda la IRF relativa all'impatto di uno *shock* positivo su prezzo del Brent Oil, notiamo che il prezzo delle azioni di Tesla risponde in modo positivo. L'aumento iniziale si stabilizza rapidamente nei primi giorni per poi proseguire con una traiettoria leggermente crescente nel lungo periodo. Questo risultato suggerisce che gli investitori potrebbero interpretare un rialzo del prezzo del petrolio come un incentivo alla transizione verso i veicoli elettrici, con un possibile effetto benefico per Tesla. Tuttavia, ricordiamo che l'analisi del coefficiente β_2 ha evidenziato che il Brent non gioca un ruolo significativo nell'equilibrio di lungo periodo. Pertanto, possiamo affermare che il prezzo del petrolio non rappresenta una variabile chiave nella determinazione del valore delle azioni di Tesla, pur avendo un impatto immediato e positivo nel breve termine, il quale potrebbe essere attribuito a effetti di natura speculativa piuttosto che a relazioni strutturali tra le due variabili.

Per il carbonato di litio, l'analisi della IRF mostra che uno *shock* positivo nel suo prezzo genera una risposta inizialmente negativa per il valore delle azioni Tesla, suggerendo

che l'aumento del costo di questa materia prima venga percepito inizialmente come un fattore di pressione sui margini di profitto dell'azienda. Tuttavia, questa reazione negativa tende ad attenuarsi nel tempo, con il prezzo delle azioni che mostra un recupero progressivo. Questo comportamento potrebbe riflettere il fatto che, sebbene un aumento del prezzo del litio possa rappresentare un incremento dei costi di produzione, il mercato potrebbe anche interpretarlo come un segnale di una maggiore domanda di BEV, con effetti positivi sulle aspettative degli investitori. Inoltre, Tesla potrebbe essere percepita come meno vulnerabile rispetto ai concorrenti grazie alla sua capacità di ottimizzare costi di produzione con contratti di fornitura a lungo termine.

Per il cobalto, l'IRF mostra che un aumento improvviso del suo prezzo non provoca una reazione significativa immediata nel valore delle azioni Tesla. Tuttavia, entro pochi giorni dallo *shock* iniziale, il prezzo del titolo inizia a declinare in modo persistente. A differenza del litio, che dopo un'iniziale flessione ha mostrato segnali di ripresa per le azioni Tesla, il cobalto presenta quindi un impatto negativo che tende a perdurare nel tempo. Queste dinamiche non favoriscono Tesla, suggerendo che il mercato interpreta il cobalto principalmente come un costo aggiuntivo per la produzione che come un indicatore della domanda di veicoli elettrici.

Per l'IRF relativa al prezzo del nickel, uno *shock* positivo genera inizialmente una forte reazione negativa nel prezzo delle azioni Tesla, che subisce una marcata flessione. Tuttavia, dopo questa discesa iniziale, la traiettoria della risposta mostra una crescita graduale, suggerendo che l'effetto inizialmente negativo si attenua nel tempo. Questo andamento suggerisce che, come per il litio, il mercato tende a riassorbire la reazione inizialmente negativa nel medio-lungo periodo. Questo aspetto, unito all'analisi del coefficiente di cointegrazione β_5 , conferma l'esistenza di un legame strutturale positivo tra il prezzo del nickel e il valore delle azioni Tesla nel lungo periodo, nonostante possibili fluttuazioni di breve termine. Tuttavia, è necessario ricordare che, rispetto ad altre materie prime come litio e cobalto, il nickel potrebbe giocare un ruolo relativamente meno determinante nella valutazione di Tesla, data la sua ampia applicazione in altri settori industriali.

Infine, l'IRF relativa all'oro raffinato evidenzia una reazione immediatamente positiva del valore del titolo Tesla. Dopo un aumento iniziale, il prezzo delle azioni tende a stabilizzarsi per poi proseguire con una crescita graduale. Questo comportamento è

coerente con l'analisi del coefficiente di cointegrazione, suggerendo un legame positivo e persistente tra le due variabili, probabilmente riconducibile a fattori macroeconomici più ampi e complessi.

In conclusione, l'analisi congiunta delle *Impulse Response Function* e dei coefficienti di cointegrazione ha evidenziato che tra le materie prime considerate, il litio, il nickel e l'oro raffinato esercitano un'influenza significativa e persistente sul valore delle azioni Tesla. In particolare, il litio e il nickel mostrano una dinamica simile: uno *shock* positivo inizialmente genera una reazione negativa nel valore del titolo Tesla, probabilmente a causa delle preoccupazioni legate a un aumento dei costi di produzione. Tuttavia, questa reazione tende ad attenuarsi nel tempo, lasciando spazio a una crescita graduale nel medio-lungo periodo, suggerendo che il mercato interpreti l'aumento dei prezzi di queste materie prime come un segnale di crescita del settore EV. L'oro raffinato, invece, potrebbe riflettere dinamiche macroeconomiche favorevoli a titoli *growth* come Tesla. Al contrario, il cobalto si distingue per il suo impatto negativo e significativo, suggerendo che il mercato percepisca il suo aumento di prezzo come un incremento dei costi di produzione, piuttosto che un indicatore di crescita del settore, a differenza di quanto osservato per il litio. Infine, il Brent Oil ha generato una risposta iniziale positiva, probabilmente dovuta a una reazione speculativa del mercato nel breve periodo. Tuttavia, l'assenza di una relazione significativa nel lungo periodo conferma che il prezzo del petrolio non è un *driver* determinante per il valore delle azioni Tesla.

- Causalità di Granger

Dopo aver attentamente analizzato i coefficienti di cointegrazione e di aggiustamento, oltre che le *Impulse Response Functions*, ritengo che sia utile approfondire ulteriormente le relazioni dinamiche tra le variabili attraverso il test di causalità di Granger. Mentre il VECM e le IRF ci offrono informazioni sulle relazioni di lungo e breve periodo, questo test consente di verificare se le variazioni passate di una variabile nel breve termine contribuiscono a migliorare significativamente la previsione di un'altra⁵³. Nel contesto della nostra analisi, risulta quindi particolarmente utile per

⁵³ Wikipedia contributors. (2025, January 26). Granger causality. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Granger_causality.

verificare se il prezzo del Brent e delle materie prime considerate possano fornire un contributo significativo nella previsione del valore delle azioni di Tesla.

Per applicare questo test nel nostro contesto, riprendiamo il modello VECM in forma scalare introdotto precedentemente:

$$\Delta y_{i,t} = \delta_i + \alpha_i u_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{ij} \Delta y_{i,t-j} + \varepsilon_{i,t}$$

Per semplicità dell'esposizione, ipotizziamo di avere solo due variabili ($N=2$), Tesla e Brent Oil:

$$\text{TESLA: } \Delta y_{1,t} = \delta_1 + \alpha_1 u_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{11,j} \Delta y_{1,t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{12,j} \Delta y_{2,t-j} + \varepsilon_{1,t}$$

$$\text{BRENT: } \Delta y_{2,t} = \delta_2 + \alpha_2 u_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{21,j} \Delta y_{1,t-j} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{22,j} \Delta y_{2,t-j} + \varepsilon_{2,t}$$

Il parametro $\Gamma_{12,j}$ cattura l'effetto delle variazioni passate del Brent (al *lag j*) sul valore corrente del titolo Tesla. Pertanto, per verificare se il petrolio ha capacità predittiva sul titolo della società, dobbiamo concentrarci su questo parametro.

In particolare, l'ipotesi nulla del *Granger causality F-test* verifica se i ritardi di y_2 (Brent) non hanno effetto significativo su y_1 (Tesla), è quindi data da:

$$H_0: \Gamma_{12} = 0 \quad \forall j$$

Per effettuare il test F di Granger, è necessario costruire un secondo modello ristretto che escluda i ritardi della variabile di cui si intende testare la causalità. Nel nostro caso, ciò implica la rimozione dei ritardi di y_2 (Brent) nell'equazione di y_1 (Tesla):

$$\text{TESLA: } \Delta y_{1,t} = \delta_1 + \alpha_1 u_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_{11,j} \Delta y_{1,t-j} + \varepsilon_{1,t}$$

Questa equazione ora dipende solo dai ritardi di Tesla (y_1). Se il nuovo modello ristretto risulta essere significativamente peggiore rispetto a quello completo, allora

possiamo concludere che y_2 (Brent) contribuisce alla previsione di y_1 (Tesla), ovvero che esiste una relazione di causalità.

Per confrontare i modelli si utilizza il test F, il quale misura quanto peggiora il modello ristretto rispetto al modello completo. Il test F è dato da:

$$F = \frac{\frac{RSS_r - RSS_c}{q}}{\frac{RSS_c}{n - k}}$$

Di seguito sono riportate le definizioni dei parametri del test:

- RSS_c : somma dei residui al quadrato del modello completo
- RSS_r : somma dei residui al quadrato del modello ristretto
- k : numero di coefficienti $\Gamma_{i,j}$ stimati nel modello completo
- q : numero di coefficienti $\Gamma_{i,j}$ eliminati
- n : numero di osservazioni

Per entrambi i modelli, la *Residual Sum of Squares* (RSS) è calcolata come segue:

$$RSS = \sum_{t=1}^n \widehat{\varepsilon}_{i,t}^2$$

Una volta calcolato il valore della statistica F, questo può essere confrontato con il valore critico della distribuzione F corrispondente al livello di significatività scelto. Se il valore della statistica F calcolata risulta minore del valore critico, non si rigetta l'ipotesi nulla, concludendo che non vi è evidenza di una relazione di causalità. Al contrario, se la statistica F è superiore al valore critico, si rigetta H_0 , indicando che esistono prove sufficienti per affermare che vi sia una relazione di causalità, poiché il modello completo risulta più performante di quello ristretto. In alternativa, è possibile valutare il *p-value* associato al test:

$p\text{-value} > \alpha$	non causalità
$p\text{-value} \leq \alpha$	causalità

Dopo aver delineato il *framework* teorico del test F di Granger e compreso il suo ruolo nell'analisi della causalità tra le variabili, possiamo ora all'analisi empirica dei risultati. Nella Figura 14 sono riportati gli esiti del test, dai quali è possibile verificare la presenza o l'assenza di causalità confrontando i relativi *p-value* con la soglia di significatività del 5% adottata.

Figura 14 - Test F di Granger

Granger causality F-test. H_0: Closing Price Brent Oil USD/Bbl does not Granger-cause Closing Price Tesla. Conclusion: fail to reject H_0 at 5% significance level.	Granger causality F-test. H_0: Closing Price Lithium Carbonate does not Granger-cause Closing Price Tesla. Conclusion: reject H_0 at 5% significance level.
---	---

Test statistic	Critical value	p-value	df	Test statistic	Critical value	p-value	df
1.439	2.997	0.237	(2, 10146)	3.625	2.997	0.027	(2, 10146)

Granger causality F-test. H_0: Closing Price Cobalt does not Granger-cause Closing Price Tesla. Conclusion: fail to reject H_0 at 5% significance level.	Granger causality F-test. H_0: Closing Price Nickel does not Granger-cause Closing Price Tesla. Conclusion: reject H_0 at 5% significance level.
--	--

Test statistic	Critical value	p-value	df	Test statistic	Critical value	p-value	df
0.1713	2.997	0.843	(2, 10146)	3.013	2.997	0.049	(2, 10146)

Granger causality F-test. H_0: Closing Price Refined Gold does not Granger-cause Closing Price Tesla. Conclusion: fail to reject H_0 at 5% significance level.

Test statistic	Critical value	p-value	df
2.335	2.997	0.097	(2, 10146)

Dai risultati dei test emerge che solo alcune delle variabili considerate esercitano un'influenza significativa, mentre altre non presentano evidenze di relazioni di causalità.

In particolare, il Brent Oil non risulta essere un predittore significativo per il titolo Tesla, con un *p-value* pari a 0.237, ben superiore alla soglia del 5%. Questo risultato conferma le nostre deduzioni emerse dall'analisi dei coefficienti di cointegrazione e dalle IRF, ovvero che, sebbene il petrolio possa generare reazioni nel breve termine, probabilmente speculative, non costituisce un *driver* strutturale per la valutazione delle azioni di Tesla nel lungo periodo.

Per quanto riguarda il litio, il test di Granger restituisce un *p-value* inferiore al livello di significatività del 5%, indicando che il prezzo del litio è un predittore significativo del valore delle azioni Tesla. Questo risultato conferma e rafforza le evidenze già emerse dai coefficienti di lungo periodo e dalle IRF. Ciò suggerisce che il mercato interpreta l'andamento del prezzo del litio come un fattore determinante per il settore dei veicoli elettrici, esercitando un'influenza significativa sul valore della società nel tempo.

Per il cobalto, il *p-value* pari a 0.843 suggerisce che le sue variazioni passate non hanno un'influenza statisticamente significativa sul valore delle azioni Tesla nel breve termine. Tuttavia, il coefficiente di cointegrazione ha evidenziato una relazione negativa e significativa nel lungo periodo, suggerendo che, sebbene il cobalto non fornisca segnali predittivi immediati, la sua dinamica di lungo termine potrebbe comunque influenzare la percezione del mercato riguardo alla sostenibilità dei margini di profitto dell'azienda, impattando così sulla valutazione delle azioni.

Per quanto riguarda il nickel, il test restituisce un *p-value* di 0.049, confermando una relazione di causalità nei confronti del titolo Tesla. Questo risultato è coerente con quanto osservato nel coefficiente di cointegrazione, che aveva evidenziato un legame significativo tra il prezzo del nickel e la *performance* del titolo azionario nel lungo periodo. Il nickel, come visto, è un elemento chiave per la produzione di batterie NCA e NCM, e il suo impatto su Tesla si dimostra rilevante. Tuttavia, essendo il *p-value* così vicino alla soglia del 5%, è possibile che vi siano anche altri fattori indiretti che possano influenzarne il legame, come ad esempio le dinamiche globali dell'industria siderurgica, che anch'essa influisce sulla domanda di nickel.

Infine, il test di Granger per l'oro raffinato restituisce un *p-value* di 0.097. Sebbene l'ipotesi nulla non venga formalmente rigettata, il valore ottenuto richiede una riflessione più approfondita. In particolare, il risultato suggerisce che il prezzo dell'oro raffinato possa influenzare la valutazione di Tesla, ma con un livello di significatività

leggermente superiore a quello adottato (ad esempio 10%). Questo esito potrebbe essere ricondotto a due diversi motivi: da un lato, la non significatività stretta implica che il mercato non considera sistematicamente il prezzo dell'oro come un *driver* primario del titolo di Tesla; dall'altro, il *p-value* lascia aperta la possibilità che, con un campione di dati più ampio o relativo ad altri periodi temporali, tale relazione possa risultare significativa. L'analisi congiunta del coefficiente di cointegrazione e delle IRF aveva già evidenziato una relazione positiva tra il prezzo dell'oro e la valutazione del titolo Tesla. Pertanto, possiamo concludere che, sebbene il test di Granger non confermi una relazione di causalità certa, non la esclude completamente, rendendo questa coppia di variabili particolarmente interessante da monitorare in futuro. Questo risultato suggerisce che il mercato potrebbe considerare l'oro come un indicatore di condizioni macroeconomiche ampie che influenzano le scelte di investimento in titoli *growth* come Tesla.

In conclusione, l'analisi dei test F di Granger ha permesso di identificare le materie prime che influenzano significativamente il valore delle azioni Tesla e quelle che, al contrario, non risultano rilevanti per il mercato nel breve termine. I risultati confermano il ruolo chiave di alcune materie nella valutazione del titolo, mentre altre sembrano avere un impatto più limitato o circoscritto a dinamiche di lungo periodo, come nel caso del cobalto. Questi risultati offrono spunti utili per comprendere meglio il legame tra le materie prime analizzate e il settore dei veicoli elettrici, contribuendo a fornire una visione più chiara dei fattori che influenzano il titolo Tesla, sia nel breve che nel lungo periodo.

3.5. Forecasting

In quest'ultimo paragrafo del capitolo dedicato all'analisi empirica, effettueremo il *forecasting* delle variabili prese in esame. L'obiettivo è prevedere come questi fattori evolveranno nel tempo, così da anticipare possibili dinamiche di prezzo, migliorare la gestione del rischio e supportare le decisioni di investimento.

Il VECM è particolarmente adatto, in quanto le variabili considerate non solo influenzano le dinamiche di breve periodo del titolo, ma sono anche legate da una

relazione di lungo termine che il modello è in grado di cogliere, fornendo previsioni più accurate e realistiche.

Passiamo ora alla descrizione del processo di *forecasting*, analizzando come il modello possa essere utilizzato per generare previsioni a partire dalla sua formulazione teorica. Consideriamo nuovamente il nostro modello VECM in forma matriciale, già introdotto e discusso in precedenza:

$$\Delta Y_t = \delta + \Pi Y_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t-j} + \varepsilon_t$$

Per effettuare previsioni, è necessario stimare i coefficienti del modello, che verranno considerati costanti nel processo di iterazione.

A questo punto, è utile riscrivere il VECM in livelli, in quanto il nostro modello esprime le variazioni delle variabili (ΔY_t), mentre a noi interessa stimare i valori effettivi (Y_t)⁵⁴.

La trasformazione in livelli ci permette di ottenere previsioni per più periodi, costruendo ogni valore futuro a partire dalla somma delle variazioni stimate e dei valori precedenti:

$$Y_t = Y_{t-1} + \Delta Y_t$$

Il modello in livelli sarà dunque uguale a:

$$Y_t = Y_{t-1} + \delta + \Pi Y_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t-j} + \varepsilon_t$$

Riscritto il VECM in livelli, possiamo ora iterare Y_t nel tempo per ottenere le previsioni delle variabili nei periodi successivi:

$$Y_{t+1} = Y_t + \delta + \Pi Y_t + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t+1-j} + \varepsilon_{t+1}$$

⁵⁴ Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 182-186). Oxford University Press.

La previsione di Y_{t+1} si ottiene calcolando il suo valore atteso condizionato all'insieme di informazioni disponibili (*information set*) fino al tempo t :

$$\widehat{Y_{t+1}} = E[Y_{t+1}|I_t] \quad \text{dove: } I_t = \{y_1, \dots, y_t\}$$

Applicando questa definizione otteniamo l'espressione per il *forecasting* di Y_{t+1} :

$$\widehat{Y_{t+1}} = E[Y_t + \delta + \Pi Y_t + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t+1-j} + \varepsilon_{t+1} | I_t]$$

Sostituendo i parametri con le loro stime e ricordando che il termine di errore (ε_{t+1}) ha media nulla condizionatamente all'*information set*, otteniamo la seguente espressione:

$$\widehat{Y_{t+1}} = Y_t + \widehat{\delta} + \widehat{\Pi} Y_t + \sum_{j=1}^{p-1} \widehat{\Gamma}_j \Delta Y_{t+1-j}$$

Osserviamo che $\widehat{Y_{t+1}}$ è determinato dai valori correnti delle variabili, dalle loro variazioni passate e dai coefficienti stimati dal modello.

Una volta stimato $\widehat{Y_{t+1}}$, possiamo procedere con l'iterazione per ottenere $\widehat{Y_{t+2}}$:

$$\widehat{Y_{t+2}} = E[Y_{t+1} + \delta + \Pi Y_{t+1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t+2-j} + \varepsilon_{t+2} | I_t]$$

Applicando le proprietà del valore atteso, riscriviamo l'espressione come:

$$\widehat{Y_{t+2}} = E[Y_{t+1} | I_t] + \widehat{\delta} + \widehat{\Pi} E[Y_{t+1} | I_t] + \sum_{j=1}^{p-1} \widehat{\Gamma}_j \Delta E[\Delta Y_{t+2-j} | I_t]$$

Poiché $E[Y_{t+1} | I_t]$ è già stato stimato nel passo precedente, lo sostituiamo nella formula per ottenere:

$$\widehat{Y}_{t+2} = \widehat{Y}_{t+1} + \widehat{\delta} + \widehat{\Pi} \widehat{Y}_{t+1} + \sum_{j=1}^{p-1} \widehat{\Gamma}_j \Delta \widehat{Y}_{t+2-j}$$

Seguendo lo stesso ragionamento, possiamo generalizzare l'espressione per Y_{t+h} :

$$Y_{t+h} = Y_{t+h-1} + \delta + \Pi Y_{t+h-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t+h-j} + \varepsilon_{t+h}$$

Applicando ancora il valore atteso condizionato all'*information set* disponibile fino a t , otteniamo l'espressione per la previsione di Y_{t+h} .

$$\widehat{Y}_{t+h} = E[Y_{t+h}|I_t] = \widehat{Y}_{t+h-1} + \widehat{\delta} + \widehat{\Pi} \widehat{Y}_{t+h-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \widehat{\Gamma}_j \Delta \widehat{Y}_{t+h-j}$$

In sostanza, $\widehat{Y}_{t+h}$ dipende dai valori stimati nei periodi precedenti, dalle variazioni passate sia note che stimate e infine dai coefficienti del modello. È importante sottolineare che, man mano che si procede con il *forecasting* per valori di “ h ” crescenti, le nuove previsioni dipendono sempre più da valori stimati piuttosto che da dati effettivi, aumentando così il livello di incertezza delle stime nel tempo.

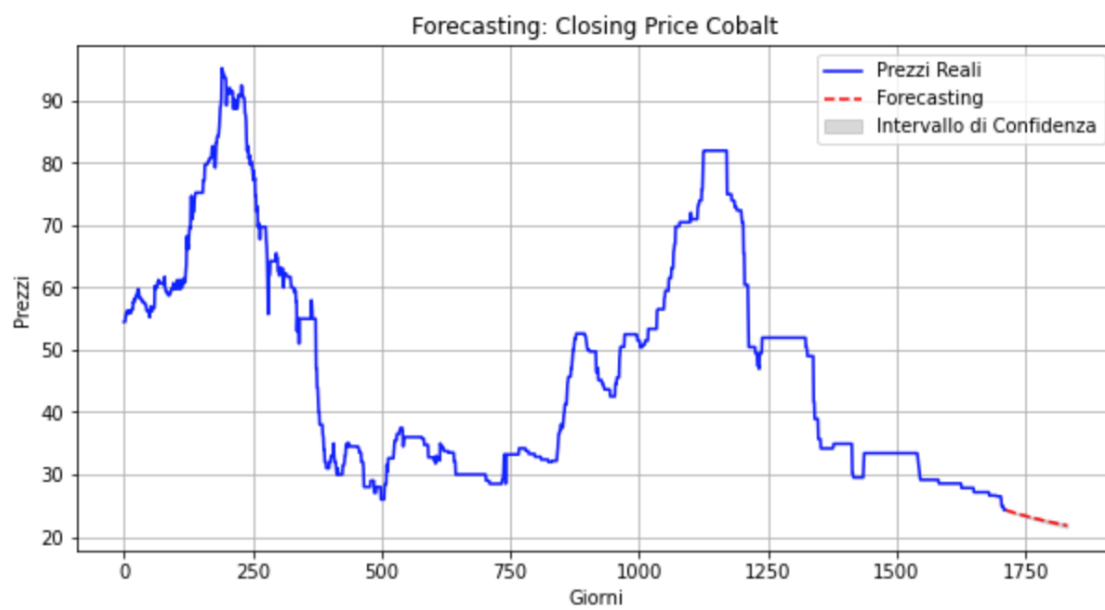
Dopo aver stimato il modello VECM, abbiamo applicato il processo di *forecasting* per osservare la possibile evoluzione futura delle variabili considerate: il prezzo di chiusura delle azioni Tesla, il Brent Oil e le principali materie prime impiegate nella produzione di batterie per veicoli elettrici. Le previsioni sono state condotte su un orizzonte temporale di 120 giorni, assumendo costanti i parametri stimati. I risultati sono riportati graficamente per ciascuna variabile nella Figura 15, con le seguenti componenti:

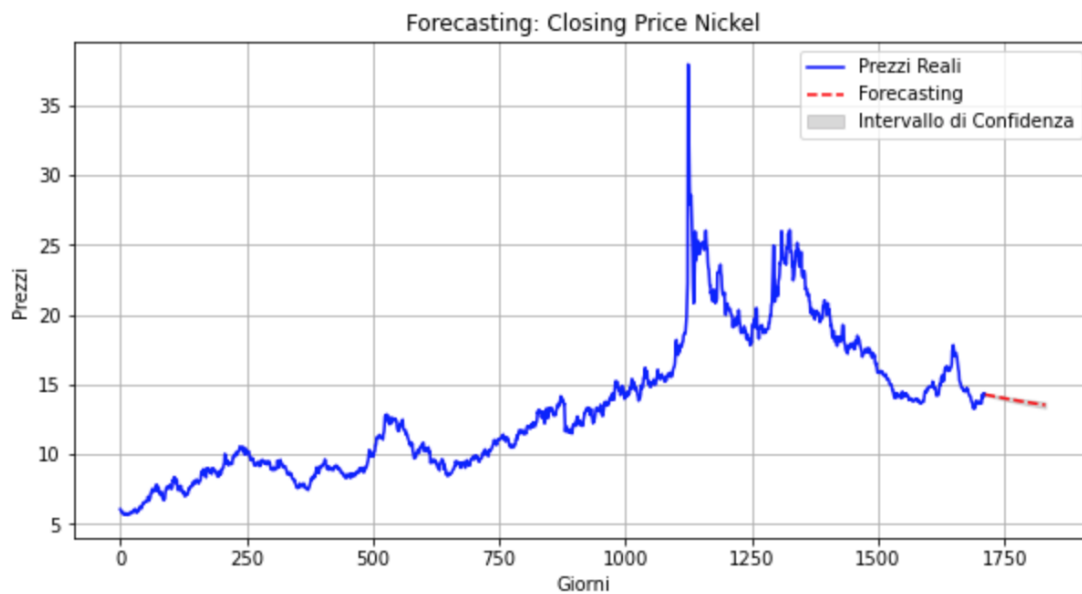
- Prezzi reali (linea blu): rappresentano l'andamento storico della variabile considerata;
- *Forecasting* (linea tratteggiata rossa): indica i valori previsti dal modello nei 120 giorni successivi;

- Intervallo di confidenza (area grigia): fornisce una misura dell'incertezza associata alle previsioni, indicando l'intervallo entro cui il valore futuro della variabile è atteso ricadere con una certa probabilità (95%).

Figura 15 – Forecasting delle Variabili







Analizzando il comportamento delle previsioni, il prezzo delle azioni Tesla mostra una tendenza rialzista, suggerendo che il modello ne prevede una ripresa nel breve termine. Questo risultato è coerente con la tendenza storica osservata, caratterizzata da fasi di crescita seguite da periodi di consolidamento. Tuttavia, il *forecast* suggerisce una crescita graduale, indicando una ripresa meno accentuata rispetto ai precedenti rialzi più marcati caratterizzati da forte volatilità. Inoltre, l'intervallo di confidenza tende ad ampliarsi leggermente con l'aumentare dell'orizzonte previsionale, riflettendo un incremento dell'incertezza della stima.

Anche il prezzo dell'oro raffinato mostra una previsione al rialzo, che appare in linea con la tendenza di lungo periodo osservata nella serie storica. Il *forecast* segue l'andamento storico del prezzo senza prevedere inversioni di tendenza, confermando una prospettiva di stabilità rialzista solida, coerente con quanto finora osservato. Tuttavia, la previsione suggerisce anche che la crescita potrebbe essere meno accentuata rispetto ai periodi di espansione più marcati del passato.

Per quanto riguarda il Brent Oil e il nickel, il modello suggerisce una fase di stabilizzazione con una leggera tendenza al ribasso, più pronunciata e incerta con l'aumentare dell'orizzonte temporale nel caso del petrolio. Dopo aver registrato in passato una significativa volatilità e raggiunto recenti picchi nei prezzi, queste materie sembrano avviarsi verso una fase di consolidamento, caratterizzata da movimenti più contenuti.

Per il litio e il cobalto, materiali strettamente legati alla produzione di batterie, il modello suggerisce un proseguimento della tendenza ribassista del prezzo già avviatasi in precedenza, evidenziando una flessione più marcata nel caso del cobalto. Questo *trend* appare coerente con l'andamento storico, nel quale si sono osservati picchi seguiti da cali molto pronunciati.

È tuttavia fondamentale considerare che nelle previsioni del modello esistono alcuni limiti che possono influenzare l'accuratezza dei risultati, in quanto esistono alcuni fattori esterni e dinamiche di mercato che potrebbero non essere pienamente catturati. Un aspetto importante riguarda le variabili non incluse nel modello, che, per fare un esempio, non tiene conto delle vendite di Tesla e della concorrenza nel settore dei veicoli elettrici, variabili che possono incidere significativamente sul valore del titolo. Un altro limite è legato all'impatto di eventi imprevedibili e fattori esogeni, che possono modificare rapidamente le dinamiche di mercato, causando repentine variazioni dei prezzi e inversioni di tendenza. Il modello, infatti, si basa su dati storici e assume che le relazioni tra le variabili rimangano stabili nel tempo. Tuttavia, nella realtà, il valore delle azioni Tesla (così come quello delle altre variabili considerate) può essere influenzato da *shock* improvvisi come pandemie, crisi economiche, conflitti geopolitici e cambiamenti normativi nel settore dell'energia e dei veicoli elettrici.

Un ulteriore elemento di instabilità è rappresentato dal *sentiment* degli investitori, che può essere influenzato in seguito a dichiarazioni pubbliche del CEO Elon Musk, una

delle figure più influenti nel panorama tecnologico e finanziario del momento. Allo stesso modo, anche eventi mediatici e politici possono avere un impatto rilevante sul titolo. È significativo l'esempio dell'elezione del 47° presidente degli Stati Uniti, Donald Trump, durante la cui campagna elettorale ha ricevuto un importante sostegno economico da parte del CEO di Tesla⁵⁵. Questo evento ha contribuito a generare un rialzo nel prezzo del titolo⁵⁶, in linea con le nostre previsioni, ma di intensità maggiore rispetto a quanto stimato dal modello.

Ciò evidenzia, da un lato, la capacità del modello di cogliere le tendenze di mercato e, dall'altro, i suoi limiti nel prevedere con precisione l'entità delle reazioni degli investitori, poiché quest'ultime sono influenzate anche da fattori esogeni e psicologici che un approccio puramente quantitativo non può catturare pienamente.

⁵⁵ Corbinzolu, N. (2024, December 7). Elon Musk ha speso oltre 250 milioni di dollari per sostenere Trump. *Treccani*. <https://www.treccani.it/magazine/atlanter/geopolitica/elon-musk-ha-speso-oltre-250-milioni-di-dollari-per-sostenere-trump.html>.

⁵⁶ Di Rocco, A. (2024, November 6). Elezioni Usa 2024, Trump Media e Tesla volano a Wall Street. *MF Milano Finanza*. <https://www.milanofinanza.it/news/trump-media-la-societa-brucia-19-milioni-nel-terzo-trimestre-le-elezioni-spingono-il-titolo-in-rally-202411061129124337>.

Capitolo 4

Conclusioni

La transizione verso un'economia sostenibile e l'adozione di tecnologie più pulite nel settore automobilistico rappresentano una sfida globale di crescente rilevanza. Tesla si è affermata come *leader* in questo cambiamento, ridefinendo il mercato automobilistico con la produzione di veicoli elettrici ad alte prestazioni. Tale contesto rende particolarmente rilevante l'analisi di Tesla e del suo ruolo nella transizione energetica. A partire da questa prospettiva, la ricerca ha esaminato la relazione tra il prezzo delle azioni Tesla, il Brent Oil e le materie prime essenziali per la produzione di batterie utilizzando un *Vector Error Correction Model* (VECM). L'obiettivo era comprendere le interazioni tra questi fattori e valutare l'impatto delle variazioni dei prezzi sulla *performance* azionaria.

Il *dataset* analizzato comprende dati storici sui prezzi di chiusura in USD delle azioni Tesla, del Brent Oil e di materie prime strategiche come litio, cobalto, nickel e oro, per un totale di 1712 osservazioni giornaliere dal 22/05/2017 al 29/08/2024. Dopo aver verificato la non stazionarietà delle serie con il test *Augmented Dickey-Fuller* (ADF) e averne confermato l'integrazione di ordine 1, è stato applicato il test di cointegrazione di Johansen. I risultati hanno evidenziato l'esistenza di una relazione di lungo periodo tra le variabili, giustificando l'utilizzo del modello VECM per analizzare sia le relazioni di equilibrio che le dinamiche di aggiustamento.

I risultati mostrano che il Brent Oil non ha un impatto significativo sulle azioni Tesla, indicando un distacco dell'azienda dalle tradizionali dinamiche del settore automobilistico legate ai combustibili fossili.

Al contrario, il litio, il cobalto e il nickel emergono come variabili chiave. La correlazione positiva tra litio e Tesla suggerisce che il mercato percepisca questa materia prima come un *driver* di crescita per l'intero settore EV. Il cobalto, invece, mostra una relazione negativa, coerente con il suo elevato costo e il suo impatto sui margini di Tesla, evidenziando la necessità di strategie per ridurre la dipendenza.

L'analisi dei test di Granger e delle IRF conferma l'importanza del litio e del nickel come fattori determinanti per la *performance* di Tesla, suggerendo che questi materiali potrebbero continuare a giocare un ruolo significativo nella crescita del titolo.

Un altro risultato significativo è il legame positivo con l'oro raffinato nel lungo periodo, riconducibile probabilmente a dinamiche macroeconomiche più ampie e alla liquidità nei mercati finanziari. Questo risultato evidenzia la necessità di monitorare le dinamiche economiche globali, poiché il prezzo dell'oro potrebbe fungere da segnale anticipatore di movimenti più ampi nei mercati finanziari, influenzando Tesla e il settore tecnologico nel suo complesso.

Infine, sebbene non abbiano un impatto strutturale nel breve termine, è importante notare che il Brent Oil, il cobalto e l'oro raffinato potrebbero comunque generare effetti speculativi sul titolo Tesla, come suggerito dalle IRF.

- Implicazioni e considerazioni finali

La ricerca mostra come l'andamento delle materie prime possa influenzare significativamente Tesla, suggerendo la necessità per l'azienda di monitorare attentamente le fluttuazioni di litio, nickel e cobalto, mentre il petrolio e l'oro, sebbene meno centrali nel breve periodo, potrebbero comunque offrire indizi utili sui movimenti economici e di mercato.

Dal punto di vista economico, i risultati offrono spunti di riflessione per investitori e analisti. Le variazioni nei prezzi di litio, cobalto e nickel possono costituire indicatori predittivi per il titolo Tesla, mentre il Brent Oil risulta ormai marginale nella valutazione dell'azienda. I ruoli positivi di litio e nickel suggeriscono che gli investitori li considerino come fattori di crescita per il settore EV. Al contrario, la correlazione negativa con il cobalto sottolinea un rischio strategico per Tesla, che dovrà continuare a diversificare le fonti di approvvigionamento e sviluppare tecnologie alternative, come le batterie LFP.

In un contesto più ampio, questi risultati confermano l'interconnessione tra il settore EV e i mercati delle materie prime critiche, evidenziando come la transizione energetica dipenda fortemente dalla disponibilità e dai costi di tali risorse. Inoltre, il legame tra Tesla e l'oro raffinato suggerisce che le condizioni macroeconomiche e la liquidità nei mercati finanziari possano influenzare le *performance* azionarie del settore tecnologico e dell'elettrico.

In conclusione, lo studio dimostra che le variazioni di prezzo di litio, cobalto e nickel influenzano significativamente il valore azionario di Tesla. La crescente indipendenza

dai combustibili fossili e il ruolo centrale della *supply chain* delle batterie delineano uno scenario in cui la stabilità dell'approvvigionamento e l'innovazione tecnologica saranno elementi chiave per il futuro della mobilità elettrica.

Tesla dovrà necessariamente ridurre la dipendenza dal cobalto, continuare ad innovare e rispondere in modo strategico alla crescente domanda di veicoli elettrici per mantenere la sua posizione di *leader* nel settore.

L'analisi condotta non solo contribuisce a comprendere le dinamiche finanziarie di Tesla, ma apre la strada a studi futuri che possano esplorare ulteriori variabili determinanti nel settore della mobilità elettrica, offrendo una visione più ampia dell'evoluzione dei mercati azionari legati alla transizione energetica.

Il continuo monitoraggio delle dinamiche economiche globali e l'evoluzione della tecnologia nel settore delle batterie, unitamente a fattori esogeni come gli sviluppi geopolitici, le politiche energetiche e il *sentiment* degli investitori, potrebbero modificare i risultati osservati.

Per approfondire ulteriormente, future ricerche potrebbero confrontare le relazioni individuate tra il prezzo delle azioni Tesla, il Brent Oil e le materie prime considerate con quelle di altri produttori di veicoli elettrici, come BYD, per verificare se tali dinamiche siano specifiche di Tesla o rappresentino una tendenza comune nel settore.

Inoltre, sarebbe utile integrare altre variabili come il costo dell'energia elettrica, il volume delle vendite o le politiche governative di incentivazione, per una comprensione più dettagliata dei fattori che influenzano le *performance* delle aziende costruttrici di BEV, contribuendo a una visione più chiara e sistematica delle dinamiche che regolano il settore.

Bibliografia

Annicchiarico, A. (2025, January 2). Tesla, primo storico calo delle consegne nel 2024. Crollo in Borsa. *Il Sole 24 ORE*. <https://www.ilsole24ore.com/art/tesla-consegne-calo-2024-resta-numero-ma-byd-e-un-soffio-AG3vhp5B>.

Annicchiarico, A. (2025b, January 30). Tesla delude sui margini ma promette nuovi modelli nel 2025. *Il Sole 24 ORE*. <https://www.ilsole24ore.com/art/tesla-delude-margini-quarto-trimestre-titolo-scende-4percento-AGjPt2cC>.

Ansa. (2021, August 26). Audi accelera trasformazione, da 2026 solo auto elettriche. *Agenzia ANSA*. https://www.ansa.it/canale_motori/notizie/industria/2021/08/26/audi-accelera-trasformazione-da-2026-solo-auto-elettriche_e6cbb19e-3511-4c96-b70c-d42f233f02a2.html.

Barcelò Lattanzi, A. (2018). Elon Musk. L'imprenditore che ha portato il futuro nel presente. *Area 51 Publishing*.

Belloro, M. (2023, August 2). Litio per batterie: Tesla rinnova con la cinese Yahua fino al 2030. *FormulaPassion.it*. <https://www.formulapassion.it/automoto/elettriche/litio-per-batterie-tesla-rinnova-con-la-cinese-yahua-fino-al-2030>.

Bhutada, G., & Alexander, A. (2022, May 2). The key minerals in an EV battery. *Visual Capitalist*. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>.

Bieker, G. (2021, July). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. *International Council on Clean Transportation (ICCT)*. https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf.

Business-Essay. (n.d.). The Tesla and Ford firms' business strategies. *Business-Essay.com*. <https://business-essay.com/the-tesla-and-ford-firms-business-strategies/>.

Clemens, K. (2021, October 28). Seismic shift: Tesla will move to LFP batteries for some Model Y and Model 3 EVs. *BatteryTech Online*. <https://www.batterytechonline.com/materials/seismic-shift-tesla-will-move-to-lfp-batteries-for-some-model-y-and-model-3-evs>.

Climate Action. (n.d.). Le cause dei cambiamenti climatici. *Commissione Europea*. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it.

Corbinzolu, N. (2024, December 7). Elon Musk ha speso oltre 250 milioni di dollari per sostenere Trump. *Treccani*. <https://www.treccani.it/magazine/atlane/geopolitica/elon-musk-ha-speso-oltre-250-milioni-di-dollari-per-sostenere-trump.html>.

Di Rocco, A. (2024, November 6). Elezioni Usa 2024, Trump Media e Tesla volano a Wall Street. *MF Milano Finanza*. <https://www.milanofinanza.it/news/trump-media-la-societa-brucia-19-milioni-nel-terzo-trimestre-le-elezioni-spingono-il-titolo-in-rally-202411061129124337>.

European Environment Agency. (2023). Greenhouse gas emissions from transport. *EEA*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>.

Forbes Italia. (2024, September 5). Volvo fa retromarcia: rinuncia a produrre solo auto elettriche entro il 2030. *Forbes*. <https://forbes.it/2024/09/05/volvo-rinuncia-produrre-solo-auto-elettriche-entro-2030/>.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (p. 84). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 120–126). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 96–97). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 143–146). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (p. 138). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 157–159). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 99–103). *Oxford University Press*.

Hurn, S., Martin, V., Phillips, P. C. B., & Yu, J. (2020). Financial econometric modeling (pp. 182–186). *Oxford University Press*.

Il Sole 24 ORE. (2023, September 26). Nissan: entro il 2030 in Europa solo auto elettriche. *Il Sole 24 ORE*. <https://www.ilsole24ore.com/art/nissan-entro-2030-europa-solo-auto-elettriche-AFFp50z>.

Irle, R. (2024, January 22). Global EV sales for 2023. *EV Volumes*. <https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/>.

Johansen, S. (1995). Likelihood-based inference in cointegrated vector autoregressive models. *Oxford University Press*.

- Kalashnikov, S. (2016). All interesting facts about Tesla Model X, well-known today. *Moscow Tesla Club*.
- Kane, M. (2022, May 13). Panasonic: Tesla asked us to speed up development of 4680-type batteries. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/585713/panasonic-tesla-speed-up-development-4680-batteries/>.
- Kane, M. (2022, May 23). A look at batteries Tesla is using in its electric cars. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/587455/batteries-tesla-using-electric-cars/>.
- Kane, M. (2024, February 10). Tesla and BYD had 35% of the global EV market in 2023. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/707935/world-top-ev-oem-sales-2023q4/>.
- Kane, M. (2024b, July 8). Global plug-in car sales hit 1.3 million in May 2024. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/725811/global-plugin-car-sales-may2024/>.
- Lambert, F. (2022, April 22). Tesla is already using cobalt-free LFP batteries in half of its new cars produced. *Electrek*. <https://electrek.co/2022/04/22/tesla-using-cobalt-free-lfp-batteries-in-half-new-cars-produced/>.
- Leader, A., Gaustad, G., & Babbitt, C. (2019). The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 8(2). <https://doi.org/10.1007/s40243-019-0146-z>.
- Leorato, S. (2012). Stazionarietà statistica - Enciclopedia - Treccani. *Treccani*. https://www.treccani.it/enciclopedia/stazionarieta-statistica_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/.
- Manners, D. (2024, September 19). BYD the only challenger to Tesla. *Electronics Weekly*. <https://www.electronicsworld.com/blogs/mannerisms/markets/byd-the-only-challenger-to-tesla-2024-09/>.
- Market Research Intellect. (2024, October 2). Approfondimenti di mercato: Come ferro nickel sta alimentando le innovazioni ad acciaio inossidabile. <https://www.marketresearchintellect.com/it/blog/market-insights-how-ferro-nickel-is-fueling-innovations-in-stainless-steel/>.
- Mo, J. Y., & Jeon, W. (2018). The impact of electric vehicle demand and battery recycling on price dynamics of lithium-ion battery cathode materials: A Vector Error Correction Model (VECM) analysis. *Sustainability*, 10(8), 2870. <https://doi.org/10.3390/su10082870>.
- NASA Earth Observatory. (n.d.). 2020 tied for warmest year on record. *NASA Earth Observatory*. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021, January 14). 2020 was Earth's 2nd-hottest year, just behind 2016. *NOAA*. <https://www.noaa.gov/news/2020-was-earth-s-2nd-hottest-year-just-behind-2016>.

Nedelea, A. (2022, April 21). Almost half of all Teslas built in Q1 had the LFP battery pack. *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/581261/tesla-lfp-battery-nearly-half-deliveries/>.

Parlamento Europeo. (2019, March 25). Emissioni di CO₂ delle auto: i numeri e i dati. *Tematiche | Parlamento Europeo*. <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica>.

Peracchi, F. (2012). Cointegrazione - Enciclopedia - Treccani. *Treccani*. [https://www.treccani.it/enciclopedia/cointegrazione_\(Dizionario-di-Economia-e-Finanza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/cointegrazione_(Dizionario-di-Economia-e-Finanza)/).

Pictet Asset Management. (2024, August). Petrolio e inflazione: come sono collegati. <https://am.pictet.com/pictetperte/mercati-e-investimenti/2024/petrolio-e-inflazione-come-sono-collegati>.

Shi, M. (2023). Design of high-performance electrodes for Tesla batteries.

Spagnuolo, M. (2019). Geopolitica dell'Esplorazione Spaziale: La sfida di Icaro nel terzo millennio. *Rubbettino Editore*.

Suman, F. (2023, April 4). *Litio, terre rare e cobalto: tre minerali critici*. Il Bo Live UniPD. <https://ilbolive.unipd.it/it/news/litio-terre-rare-cobalto-tre-minerali-critici>.

Talon Metals Corp. (2022, January 10). Tesla and Talon Metals enter into supply agreement for nickel. *Talon Metals Corp.* <https://talonmetals.com/tesla-and-talon-metals-enter-into-supply-agreement-for-nickel/>.

Tesla, Inc. (2021). Tesla impact report 2021. *Tesla*. https://www.tesla.com/ns_videos/2021-tesla-impact-report.pdf.

Tong, P. (2023). Analysis of influencing factors in the new energy automobile industry based on linear regression models. *Advances in Economics, Business and Management Research* (pp. 720–730). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-098-5_82.

Unione Europea. (2021, June 30). Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 («Normativa europea sul clima»). *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>.

Viecha, M. [@MartinViecha]. (2021, November 11). [Tweet]. X. <https://x.com/MartinViecha/status/1458807963829690370>.

Wikipedia contributors. (2025, January 26). Granger causality. *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Granger_causality.

Wikipedia contributors. (2025b, January 1). Tesla Roadster (first generation). *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster_%28first_generation%29.

WisdomTree. (2022, November). Gold foundation paper. *WisdomTree*.
<https://www.wisdomtree.eu/-/media/eu-media-files/other-documents/foundation-papers/gold-foundation-paper.pdf>.

Wittner, M. (2020, September). Brent: the world's crude benchmark. *ICE*.
<https://www.ice.com/insights/market-pulse/brent-the-worlds-crude-benchmark>.

Yahoo Finance. (n.d.). Tesla, Inc. (TSLA) stock price, news, quote & history. *Yahoo Finance*. Retrieved February 7, 2025, from <https://it.finance.yahoo.com/quote/TSLA/>.