



DIPARTIMENTO DI IMPRESA E MANAGEMENT
Corso di Laurea Triennale in Economia e Management
Cattedra di Statistica applicata ed Econometria

**EFFETTI DELLA PERFORMANCE AMBIENTALE SULLA
CRESCITA INDUSTRIALE: ANALISI ECONOMETRICA
DEL SETTORE MANIFATTURIERO EUROPEO**

Prof. Antonio Pacifico

RELATORE

Gabriele Pio Bergonzini 271311

CANDIDATO

Anno Accademico 2023/2024

Indice

INTRODUZIONE	2
1.LA CONDIZIONE AMBIENTALE EUROPEA	4
1.1 Il legame tra progresso e ambiente	4
1.2 Il Settore Manifatturiero Europeo: distribuzione geografia e settoriale del valore	6
1.2.1 Una review delle policy ambientali europee tra passato e presente	9
1.2.2 Trend climatici del settore manifatturiero	11
1.3 Il settore manifatturiero e la sostenibilità	14
1.3.1 La Fabbrica del Futuro: Verso una produzione Sostenibile.....	17
2. LA RELAZIONE TRA CRESCITA INDUSTRIALE E AMBIENTE	21
2.1 Il trade-off tra ambiente e crescita industriale: le criticità dei modelli tradizionali di valutazione integrata	21
2.1.1 Prima assunzione: sottostima dei rischi	23
2.1.2 Seconda assunzione: Inefficienze di mercato	24
2.1.3 Terza assunzione: Approcci non solidi allo sconto.....	24
2.1.4 Quarta assunzione: gli effetti di distribuzione	25
2.2 Le opportunità di una crescita sostenibile	26
2.3 Gli ostacoli alla crescita	28
2.3.1 Le trappole sugli equilibri e la path dependance	30
3. ANALISI EMPIRICA DELLA RELAZIONE TRA CRESCITA INDUSTRIALE E AMBIENTE	32
3.1 Costruzione del dataset e variabili d’interesse	33
3.1.1 Indicatori di riferimento	34
3.1.2 Produzione nell’industria.....	35
3.1.3 PIL e Popolazione.....	35
3.1.4 Esportazioni e Importazioni	36
3.1.5 Investimenti fissi lordi (<i>Gross Capital Formation</i>).....	36
3.1.6 Crescita della popolazione.....	37
3.1.7 Occupazione	38
3.1.8 Concentrazioni di Gas Serra.....	38
3.1.9 Quota percentuale delle fonti rinnovabili sul consumo di energia finale.....	39
3.1.10 Intensità Energetica	39
3.1.11 Produttività del lavoro	40
3.2 Elaborazione dei Dati	41
3.3 Analisi preliminare	41
3.4 Stima dei modelli di Regressione	43
3.4.1 Test di significatività e Bontà d’adattamento	45
3.4.2 Interpretazione dei coefficienti stimati	48
3.5 Analisi di Serie Storiche: Analisi Preliminare	53
3.5.1 Autocorrelation Function e Partial Autocorrelation Function	56
3.6 Analisi empirica	59
3.7 Diagnostica	63
3.8 Forecasting	64
4. CONCLUSIONI	68
Bibliografia e Sitografia	70

Introduzione

Il cambiamento climatico rappresenta uno dei pericoli e delle sfide maggiori dei tempi moderni. Eventi climatici estremi come: uragani o esondazioni frequenti, l'innalzamento della temperatura e lo scioglimento dei ghiacciai, rappresentano solo alcuni degli effetti negativi del cambiamento climatico, ma bastano per avere ripercussioni negative rilevanti non solo sugli ecosistemi, ma anche su economie e società, mettendo a rischio la salute pubblica e la stabilità.

La causa è da attribuire all'incessante espansione umana che dalla rivoluzione industriale del XIX secolo ha portato un esponenziale aumento delle emissioni di sostanze inquinanti che deteriorano il bioma terrestre. Per questo, negli ultimi anni molte azioni sono state poste ad incentivo della sostenibilità, allo scopo di arrestare la tendenza positiva e incentivare una crescita di tipo sostenibile.

La presente tesi si pone lo scopo d'indagare la natura e la presenza di una relazione tra la crescita e l'impatto ambientale del settore manifatturiero europeo, per avere cognizione della situazione attuale e delle eventuali insufficienze delle pratiche e normative sostenibili ad oggi adottate. In questo modo sarà possibile comprendere al meglio gli impatti delle strategie messe in atto, sfruttando quanto appreso nella formulazione di nuove strategie o politiche più efficaci e sostenibili che portino beneficio allo sviluppo industriale ed economico.

La tesi mira, quindi, a fornire una panoramica sull'attuale condizione dal punto di vista della sostenibilità del principale settore industriale europeo, evidenziando la necessità di una transizione ecologica volta a scongiurare il rischio climatico, descrivendone inoltre le opportunità e criticità.

A tal proposito, nel primo capitolo sarà esposta l'attuale situazione ambientale europea e le tendenze climatiche prospettiche, con particolare riguardo al settore manifatturiero preso come caso studio. Successivamente, nel secondo capitolo verrà indagata la natura dal punto di vista teorico del legame tra l'inquinamento e la crescita industriale attraverso una disamina delle criticità dei modelli tradizionali di valutazione, esponendo inoltre i

limiti e gli ostacoli legati a una crescita sostenibile. Infine, verrà predisposta un'analisi empirica che prende come target il settore manifatturiero dei 27 Stati membri dell'Unione Europea. In termini metodologici l'analisi ha previsto la stima di due modelli di regressione multipla e di due modelli autoregressivi, per cui sono stati svolti contestualmente i test diagnostici e di bontà d'adattamento per la verifica dei risultati ottenuti, in tal senso a cercare una risposta empirica sulla natura della sopracitata relazione.

1.La condizione ambientale Europea

In questa prima sezione verrà analizzata la situazione ambientale europea partendo dal legame tra il progresso e l'ambiente. Successivamente sarà esaminato il settore manifatturiero europeo e la sua situazione ambientale, concludendo poi con la descrizione delle sfide a cui questo sarà posto dal progressivo aumento della sensibilità ambientale.

1.1 Il legame tra progresso e ambiente

Nell'ultimo secolo la storia mondiale è stata caratterizzata da grandi cambiamenti dell'ambiente globale indotti dall'espansione ed evoluzione del genere umano, i quali lo hanno influenzato negativamente. Dal 1950 in poi, i cambiamenti dell'ecosistema sono diventati più frequenti e intensi, per questo motivo il periodo in questione ha preso la connotazione di “*Great Acceleration*”, termine coniato durante un Dahlem Workshop tenuto a Berlino (tra il 12 e il 17 Giugno 2005), in cui specialisti di vari campi scientifici

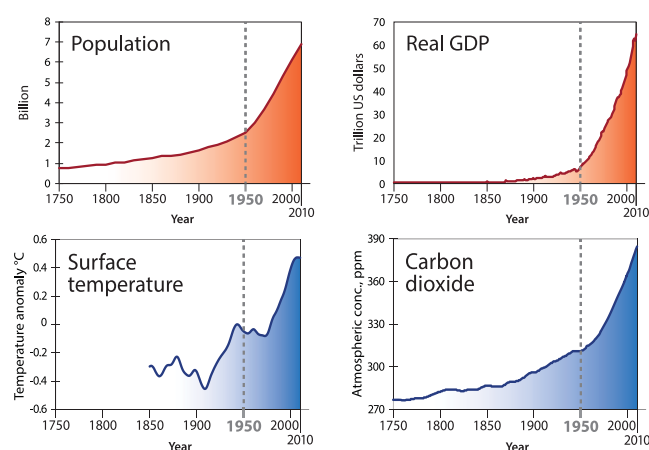


Figura 1.1 : Rappresentazione dei trend socio-economici e ambientali con lasso di tempo: 1750 – 2010. (a) Popolazione mondiale in miliardi; (b) PIL reale a valore costante del dollaro americano (valutazione 2005); (c) Temperatura della superficie terrestre; (d) concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera terrestre in ppm.

Fonte: Head, M. J., Steffen, W., Zinke, J. (2021), “The Great Acceleration is real and provides a quantitative basis for the proposed Anthropocene Series/Epoch”, *Journal of International Geoscience*, International Union of Geological Series

discussero sui cambiamenti originati dall'uomo e il loro impatto sul bioma terrestre, ad esempio: analizzando gli andamenti delle tendenze di anidride carbonica e dei cambiamenti di temperatura dimostrarono una netta intensificazione del cambiamento provocato dalle interazioni uomo-ambiente dopo la Seconda Guerra Mondiale, nominando tale periodo, appunto Grande Accelerazione, (Hibbard, K.A., Crutzen, P.J. & Steffen, W., 2007).

Dai grafici (Figura 1.1) appare evidente come l'avanzamento umano abbia influenzato in modo deleterio l'ecosistema della Terra, in particolare, dal 1950 ad oggi la popolazione mondiale è cresciuta di circa tre volte, mentre, il PIL mondiale di un fattore pari al 10.000% (passando da circa mille miliardi a 100 mila miliardi di dollari americani nel 2022)¹.

¹ PIL mondiale aggregato misurato al valore corrente del dollaro americano, 2023, World Bank database. Link: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>

La crescita del Prodotto Interno Lordo, inteso come indicatore dello sviluppo economico mondiale è strettamente legata all'intensificazione di industrializzazione e urbanizzazione, necessarie per far fronte all'aumento della popolazione, conseguendo quindi in una maggiore pressione sulle risorse naturali. La crescente industrializzazione ha portato a un aumento della produzione dei cosiddetti gas serra quali: anidride carbonica, metano e molti altri. La prima, ha avuto un aumento del 40% rispetto al 1750 (IPCC, 2013) ed è una delle principali responsabili del cambiamento climatico. Tale sovrabbondanza di gas serra, come teorizzato in principio dal fisico Joseph Fourier nel 1824 (in "Remarques generales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", pubblicato nelle Annales de Chimie et de Physique), ha un effetto isolante sull'atmosfera terrestre che trattenendo calore non fa che aumentare la sua temperatura media, che è appunto aumentata nel periodo tra il 2006 e il 2015 di 0.87 °C rispetto alla media nel periodo precedente alla rivoluzione industriale. La conseguenza totale di produrre i beni necessari, alimentare, alloggiare e fornire energia a un numero crescente di persone, ha quindi comportato l'alterazione del 75% dell'ambiente terrestre e del 40% di quello marino (IPBES,2019) che insieme all'intensificarsi degli eventi climatici straordinari come siccità e alluvioni (IPCC, 2013), hanno influito molto negativamente sulla biodiversità globale. Secondo il WWF Living Planet Report-2022, le grandi alterazioni del clima globale sono la causa della scomparsa di circa un migliaio di specie animali e vegetali e il contestuale aumento di specie animali dannose o pericolose (come insetti e vermi che veicolano malattie verso l'essere umano e la fauna selvatica). Ultimo effetto del riscaldamento globale riscontrato è il cosiddetto "feedback climatico positivo" secondo cui gli ecosistemi stanno nel tempo mettendo in atto processi che stanno avendo un effetto positivo sul riscaldamento stesso, come descritto nel suddetto documento da Almond, R.E.A., Grooten, M. & Petersen, T. (2022): cit. " L'aumento degli incendi, la morte degli alberi a causa della siccità..., l'essiccazione delle torbiere e lo scongelamento del permafrost della tundra, rilasciano più CO2 quando il materiale vegetale morto si decompone o viene bruciato. Questo sta iniziando a trasformare i sistemi che storicamente hanno costituito depositi di carbonio in nuove fonti di carbonio atmosferico"².

²Almond, R.E.A., Grooten, M., Petersen, T. (2022), "WWF- Living Planet Report-2022", WWF.

In sintesi, ad oggi è stata stimata una perdita del 30% di foreste, savane e boschi dalla parte vegetale, mentre secondo l'indice LPI globale 2022 (fornito da WWF nel documento citato) c'è stato un calo medio del 69% di biodiversità tra il 1970 e il 2018. In conclusione, l'evidenza sembra suggerire una correlazione del tutto negativa tra lo sviluppo economico ed umano e la condizione ambientale del pianeta, ma questa verrà analizzata empiricamente nei capitoli successivi. Scendendo più nello specifico nel prossimo paragrafo, si andranno ad analizzare le principali tendenze ambientali del settore manifatturiero Europeo.

1.2 Il Settore Manifatturiero Europeo: distribuzione geografica e settoriale del valore

La denominazione “settore manifatturiero” comprende tutte le attività industriali che si occupano della trasformazione di materie prime grezze in prodotti finiti, questi possono essere venduti direttamente ai consumatori in alcuni casi, o venduti ad altre attività industriali per ulteriori lavorazioni in altri.

La produzione manifatturiera Europea si trova in una tendenza di crescita positiva, nonostante lo scoppio della pandemia di COVID-19 e le conseguenti misure di contenimento attuate dagli stati membri; di seguito un'analisi sul fronte quantitativo e qualitativo del valore della produzione totale venduta condotta attraverso i dati forniti da Eurostat: Industrial production statistics -Eurostat, 2023- dati : sts_inpp_a.

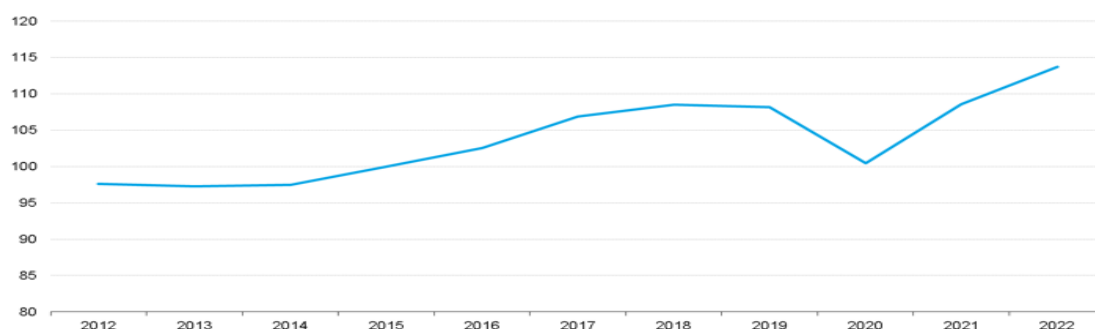


Figura 1.2 : Evoluzione del valore della produzione industriale venduta (indice 2015= 100)
Fonte: Eurostat - 2022

Come risulta evidente dal grafico in figura (Figura 1.2), lo scoppio della pandemia e le sue conseguenze hanno generato degli effetti negativi sul valore della produzione industriale venduta nel 2020, ciononostante l'indice non è sceso sotto i valori pre-2015,

successivamente la crescita è ripresa raggiungendo nel 2022 un valore totale di circa 6000 miliardi di euro.

La crescita è stata trainata da sei gruppi di attività (evidenziati nella *Figura 1.3*), classificati tramite le prime due cifre della classificazione statistica delle attività economiche (NACE), i gruppi in questione sono:

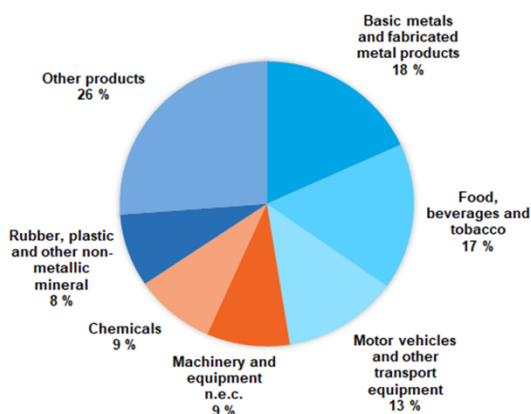


Figura 1.3 : Distribuzione del valore della produzione manifatturiera per attività NACE, Fonte: Eurostat -2022

- Metallurgia e fabbricazione di altri prodotti della prima trasformazione dell'acciaio (18%)
- Alimentari, bevande e prodotti del tabacco (17%)
- Veicoli a motore e altri equipaggiamenti per il trasporto (13%)
- Fabbricazione di macchinari e apparecchiature non codificate altrove (10%)
- Fabbricazione di sostanze chimiche (9%)
- Fabbricazione di prodotti chimici (8%)
- Altri prodotti (27%)

Tra i sei gruppi principali : metallurgia e fabbricazione di altri prodotti della prima trasformazione dell'acciaio; Alimentari, bevande e prodotti del tabacco; veicoli a motore e altri equipaggiamenti per il trasporto, rappresentano il 48% del totale del valore della produzione venduta nel 2022. Sul piano storico invece le attività manifatturiere che hanno registrato nel 2022 degli aumenti significativi rispetto al 2012 sono: la produzione dei prodotti metallici con un incremento pari al 69% è stata l'attività migliore, la produzione di prodotti alimentari che ha avuto un incremento pari all'11%, la produzione di macchinari e apparecchiature insieme con la produzione di veicoli a motore e altri

equipaggiamenti per il trasporto hanno avuto un incremento rispettivamente del 9% e del 5% (Figura 1.4).

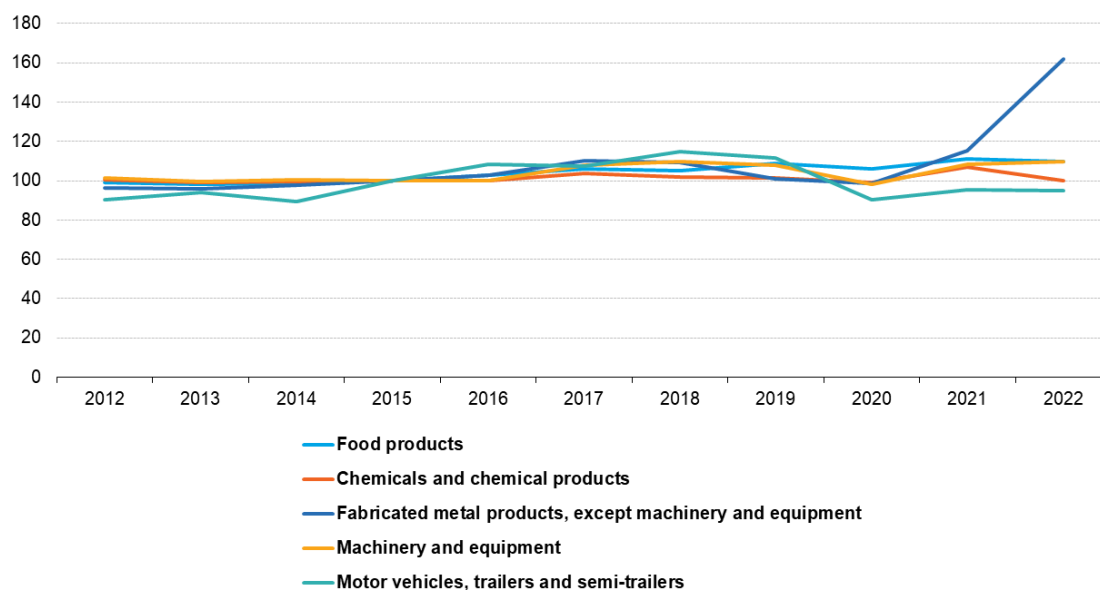


Figura 1.4 : Evoluzione storica del valore della produzione venduta delle 5 migliori attività manifatturiere, periodo storico : 2012-2022. Anno base indice: 2015=100
Font: Eurostat- 2022

Analizzando i dati Eurostat sulla produzione, ponendo particolare attenzione alla distribuzione geografica del valore della produzione venduta, si nota come la Germania insieme con Italia, Francia, Spagna, Polonia e Paesi Bassi, hanno contribuito alla maggior parte del valore totale di quest'ultima (circa il 74%). Andando più nel dettaglio, rispetto alle tre attività con incrementi più alti si osserva che:

l'Italia si è distinta per la metallurgia e la fabbricazione di altri prodotti della prima trasformazione dell'acciaio, rappresentando il 36% del totale della produzione del paese (seguita da Bulgaria, Grecia e Slovenia); la produzione di prodotti alimentari, bevande e prodotti del tabacco è invece la voce principale della produzione Greca generando circa il 35% (seguita da Croazia, Spagna, Paesi Bassi e Danimarca); per la produzione di veicoli a motore e altre apparecchiature per il trasporto, la Slovacchia ha segnalato il dato più alto dell'Unione Europea circa il 40% della produzione (seguita da Cechia, Ungheria e Romania). Sul prospetto globale in termini quantitativi, rispetto alle attività menzionate in precedenza, la Germania si erge sul resto degli stati membri con un valore rispettivamente di 228,188 e 293 miliardi di euro nel 2022.

1.2.1 Una review delle policy ambientali europee tra passato e presente

La storia della legislazione Europea sui temi ambientali origina dopo la prima conferenza ONU sull'ambiente (tenutasi a Stoccolma nel 1972), tale evento ha infatti acceso il processo legislativo europeo che ha portato nel Novembre 1973 al primo Programma di Azione per l'Ambiente (PAA)³. Il primo programma aveva lo scopo di determinare un approccio alla definizione degli obiettivi ambientali europei, in esso si evidenziava infatti la necessità di una comprensione del fenomeno "inquinamento" sotto le varie forme in cui questo si manifesta e ovviamente sulle cause che lo generano.

Successivamente fu emanato un secondo PAA⁴ riferito al periodo 1977-1981, che allargò lo spettro dei problemi ambientali considerati, integrando il primo che invece si concentrava sui rischi ambientali legati alla contaminazione delle acque e i rifiuti. Con il tempo sono stati emanati vari programmi portando un'evoluzione anche degli obiettivi che li guidano, malgrado ciò, alcuni obiettivi come la prevenzione, riduzione e il contenimento dei danni ambientali, sono rimasti la base anche dei programmi più recenti. L'ottavo Programma di Azione per l'Ambiente riferito al periodo (2015-2020)⁵ pone come obiettivo cardine uno stile di vita sostenibile che rispetti l'ambiente e rimarrà in vigore fino al 2030 ed origina dalle allarmanti analisi condotte dalla Commissione ambientale Europea nel SOER 2020 ed è allineato con gli obiettivi globali di lungo-termine: l'Agenda ONU 2030 contenente 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (con ad essi associati 169 target sostenibili) e l'Accordo di Parigi il primo accordo legalmente vincolante firmato da 196 paesi in cui questi si impegnano a ridurre le loro emissioni di almeno il 55% entro il 2030 (rispetto ai livelli del 1990). L'evoluzione legislativa in difesa dell'ambiente ha portato nel 2010 all'emanazione di un testo specifico per il settore industriale, l'Industrial Emission Directive. La direttiva disciplina le emissioni inquinanti degli impianti industriali europei obbligandoli a operare in base ad autorizzazioni, rilasciate dagli Stati membri. I requisiti minimi contenuti all'interno delle suddette autorizzazioni sono stabiliti sulla

³ Primo Programma di Azione per l'Ambiente, (1973), *Gazzetta Ufficiale Comunità Europea* : C112, 1973, Consiglio delle Comunità Europee

⁴ Secondo Programma di Azione per l'Ambiente, (1977), *Gazzetta Ufficiale Comunità Europea*: C139 1977, *Consiglio delle Comunità Europee*

⁵ Ottavo Programma di Azione per l'Ambiente, (2022), *Gazzetta Ufficiale Comunità Europea*: L114/22 2022, Consiglio delle Comunità Europee

base dei criteri giustificati nella direttiva e riguardano in modo globale e integrato tutte le emissioni dell'impianto coprendo tutti i rischi ambientali. Oltre che limitare però, la direttiva si preoccupa di determinare le misure che ogni impianto industriale dovrebbe mettere in atto per contribuire alla protezione dell'ambiente, tali tecniche sono dette migliori tecniche disponibili o BAT. Queste pratiche ottimali per l'attività industriale, insieme con i limiti di emissione imposti, vengono discusse e decise da un comitato formato da esperti provenienti da più stati membri, i quali adempiono al loro scopo scambiandosi informazioni su un forum appositamente creato dalla Comunità Europea. Le conclusioni raccolte in merito alle BAT confluiscono nei "documenti di riferimento sulle BAT" e vengono poi utilizzate per la determinazione dei valori limite e dei requisiti minimi che comporranno la direttiva. Nella costruzione dei valori limiti, la direttiva lascia spazio alla flessibilità, infatti, esistono casi particolari in cui le autorità competenti definiscano valori limite che si discostano da quelli determinati nelle BAT, i casi previsti secondo la Direttiva sono (Direttiva 2010/75/UE):

- L'applicazione dei valori limite comporta costi sproporzionalmente elevati rispetto ai vantaggi ambientali connessi. I valori predisposti seppur si discostino dalle BAT, secondo quanto previsto, devono essere frutto di valutazioni rigorose e comunque non causare inquinamenti significativi
- Per permettere la sperimentazione di nuove tecniche: nel caso in cui queste potrebbero garantire livelli di protezione ambientale più alti. Vengono concessi perché nelle fasi di sviluppo le modifiche apportate agli impianti industriali potrebbero nel breve termine generare un aumento del livello di emissioni dannose per l'ambiente.

Nonostante la flessibilità prevista la Direttiva prevede un rigido regime di ispezioni che assicurino l'adesione degli impianti ai requisiti, ogni 1 o 3 anni. Ad oggi, come riportato dalla Commissione Europea (supportata da vari studi indipendenti), la direttiva ha già contribuito a ridurre l'impronta inquinante del settore industriale europeo. Ciò nonostante, il testo è sottoposto a una costante analisi per incontrare le necessità emergenti e convergere con il piano globale delle direttive, ne è un esempio la revisione del 2022 in cui sono la direttiva è stata portata in linea con il Green Deal Europeo e il piano d'azione inquinamento zero. In conclusione, a livello mondiale, anche l'Organizzazione delle Nazioni Unite comprende nell'Agenda 2030 un riferimento all'inquinamento industriale,

specificatamente in due obiettivi 9.4 (miglioramento e riconfigurazione sostenibile delle infrastrutture) e 12.4 (gestione eco-compatibile delle sostanze chimiche e i rifiuti).

1.2.2 Trend climatici del settore manifatturiero

Secondo quanto riportato dal SOER 2020 della European Environment Agency (EEA)⁶ il settore industriale ha generato più del 25% delle emissioni di anidride carbonica e, più globalmente, del 50% del totale delle emissioni di gas serra (GHG), contribuendo sostanzialmente al cambiamento climatico. La combustione di fonti fossili come il carbone o il petrolio è la causa principale della produzione di tali emissioni dannose, tale combustione è al centro dell'attività operativa degli impianti industriali che si occupano della produzione energetica. Nonostante ciò, non solo gli impianti energetici contribuiscono a tali emissioni, ma anche tutti gli impianti industriali che nello svolgimento delle loro attività core producano autonomamente elettricità, poiché strumentale all'attività operativa, oppure necessitano, nella produzione, di calore. Inoltre, anche le attività in cui vengono generate delle polveri o utilizzati solventi chimici generano emissioni dannose nell'atmosfera, queste però non riguardano l'anidride carbonica bensì il particolato atmosferico nel primo caso e altri gas serra nel secondo. Negli ultimi anni le tendenze sulle emissioni atmosferiche raccolte negli Outlook della EEA sono molto positive, riportando una generale riduzione in tali emissioni per tutti i settori industriali. Nel periodo di osservazione di 10 anni, tra il 2007 e il 2017, considerato nel SOER 2020 risulta una riduzione del 12% dei gas serra emessi, con un evidente riduzione dell'anidride carbonica in tutti i settori, incluso quello energetico.

⁶European Environment Agency. (2019). "The European environment —state and outlook 2020 Knowledge for transition to a sustainable Europe". EEA

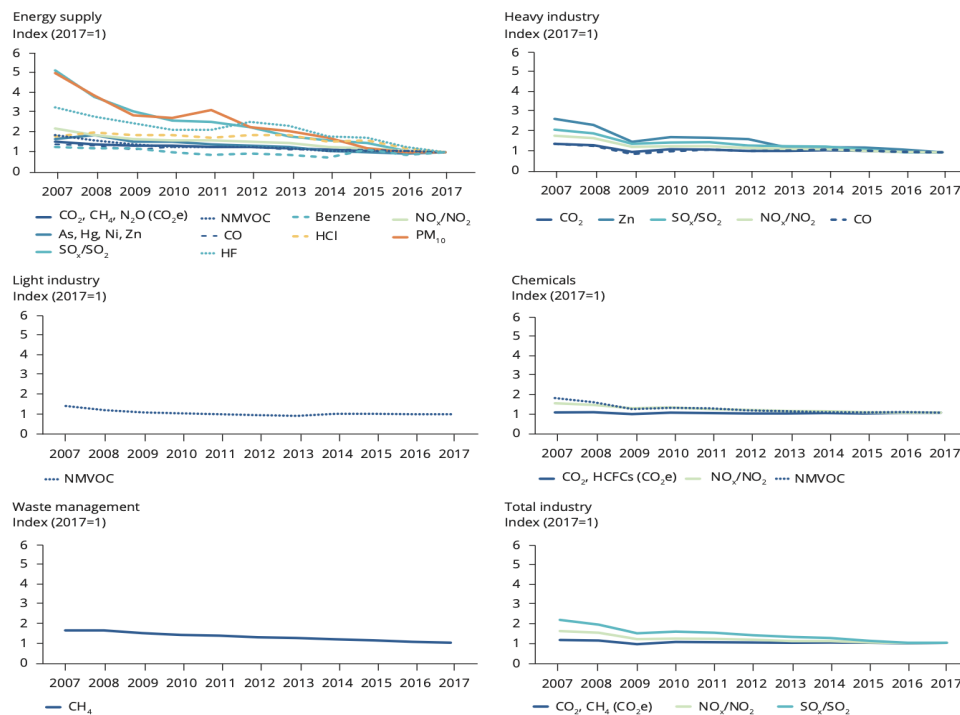


Figura 1.5 : Emissioni industriali dei principali fattori inquinanti in Europa tra il 2007 e il 2017, anno base 2017=1.
Fonte: EEA, 2019

Nell'intervallo considerato, come evidente dai grafici in figura (Figura 1.5), l'industria totale ha presentato appunto la contrazione della quantità di anidride carbonica prodotta precedentemente citata, accompagnata da una riduzione di maggior entità dei gas acidificanti (SO_x) che rappresentano un pericolo per le precipitazioni. La riduzione della produzione di suddetta sostanza si è presentata prettamente nel settore manifatturiero pesante (si intendano le industrie di lavorazione di prodotti metallici ferrosi e no, insieme con l'industria estrattiva) ed energetico. Una riduzione dal punto di vista complessivo è stata riscontrata anche rispetto agli ossidi di azoto sostanze inquinanti che quando disperse nell'atmosfera, reagendo con altre generano prodotti che mettono a rischio la salute dell'essere umano. La riduzione degli ossidi di azoto ha caratterizzato il settore energetico, quello manifatturiero pesante e il settore chimico. Alle riduzioni di queste sostanze si aggiunge anche quella dei non-methane volatile organic compounds, gas organici tra i più potenti gas serra. La riduzione di questa sostanza è estata evidenziata nell'industria manifatturiera leggera (si intendano tutti gli altri settori manifatturieri diversi da quelli citati) e il settore chimico. Per quanto riguarda il settore della gestione rifiuti, durante il periodo di monitoraggio, è stata evidenziata una riduzione del metano prodotto, tale riduzione contribuisce positivamente alla riduzione dell'inquinamento atmosferico in quanto

il metano è uno tra i gas serra più potenti. L'inquinamento atmosferico non esaurirebbe in modo soddisfacente l'analisi delle tendenze ambientali del settore manifatturiero europeo, di elevata rilevanza è anche l'inquinamento delle acque. La produzione industriale si serve spesso dell'acqua a vari scopi, tra cui per esempio il raffreddamento, processo in cui l'acqua in forma liquida o di vapore viene utilizzata per il raffreddamento di sostanze. Lo sfruttamento nel processo produttivo dell'acqua porta alla conseguente generazione di acque di scarico in cui sono disciolte sostanze che mettono a rischio il bioma marino, quindi indirettamente, anche l'essere umano.

L'emissione di sostanze inquinanti nelle acque da parte delle industrie avviene in due modalità dette rilascio diretto e indiretto (rappresentazione grafica in *Figura 1.6*):

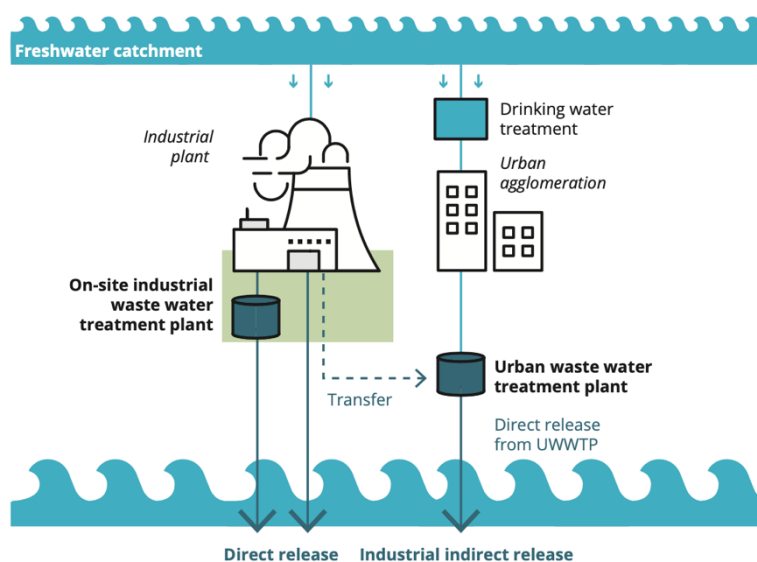


Figura 1.6 : Processo di rilascio delle acque di scarico, Fonte: EEA, 2019

- **Rilascio diretto:** le industrie dopo aver utilizzato l'acqua nel processo produttivo, dovrebbero trattare tali acque in modo da ridurre le sostanze inquinanti o eliminarle, quando possibile, del tutto. Il trattamento è spesso non sufficiente o addirittura assente, in tal modo le acque di scarico inquinate vengono rilasciate direttamente.
- **Rilascio indiretto:** il rilascio indiretto si manifesta invece a causa del trattamento insufficiente da parte degli impianti di trattamento delle acque urbane a cui gli impianti industriali hanno la possibilità di inviare le loro acque di lavorazione.

Secondo i dati forniti dal SOER 2020 il 18% dei corpi d'acqua naturali come fiumi, laghi, mari e oceani sono contaminati dalle acque di scarico, sia d'origine industriale (5%) sia urbane (13%). I dati SOER, rivelano inoltre che la quantità di sostanze inquinanti nel periodo precedentemente esaminato (2007-2017) si è complessivamente ridotto nell'ambito del rilascio diretto, mentre è marginalmente aumentato quello causato dal rilascio indiretto. Analizzando nel dettaglio gli agenti inquinanti principali si può notare che: la quantità di sostanze inorganiche disciolte rappresenta l'agente inquinante con partecipazione relativa al rilascio di inquinanti più, la responsabilità per il rilascio diretto di queste sostanze è imputata al settore chimico per più del 50%, mentre è per il rilascio indiretto il settore estrattivo si aggiunge a quello chimico, con un totale cumulato del 40%. Le sostanze clorurate, composti tossici sia per l'essere umano che per la fauna ittica, sono invece rilasciate principalmente dall'industria leggera per quanto riguarda il rilascio diretto e da quella chimica per quanto riguarda il rilascio indiretto. L'industria leggera, però è responsabile anche del rilascio in modo sia diretto che indiretto altre sostanze organiche tossiche.

La tendenza che risulta evidente è quindi una riduzione generale degli agenti inquinanti di natura industriale, tale risultato non è però sufficiente a ridurre il livello di significatività del problema ambientale, nonostante ciò, rappresenta un traguardo per l'Unione Europea e soprattutto una dimostrazione dell'efficienza del suo modello di policy.

1.3 Il settore manifatturiero e la sostenibilità

La storia ha dimostrato nel tempo quanto l'industria manifatturiera fosse la chiave per le grandi potenze globali, è proprio grazie a questo settore che nel 1800 l'Inghilterra è diventata una potenza globale, seguita da Stati Uniti, Germania, Giappone e l'ex Unione Sovietica nel XX secolo. L'industria manifatturiera è tutt'ora il fattore chiave per lo sviluppo e la prosperità delle nazioni e quindi per la crescita. I prodotti del settore non sono solo i beni venduti ma anche nuovi e più innovativi strumenti e macchinari che produrranno a loro volta nuovi macchinari creando un ciclo di innovazione che porta all'avanzamento tecnologico e la crescita. Negli ultimi anni le principali tendenze dal punto di vista produttivo che interessano il settore manifatturiero sono due, correlate ma opposte. La prima tendenza riguarda i paesi industrializzati i quali, gravosi della tassazione ambientale, tendono a esternalizzare la produzione in paesi emergenti in cui il costo

della manodopera è minore, in contrapposizione in quei paesi emergenti la tendenza è un incessante aumento della produzione, grazie appunto all'esternalizzazione dei paesi sviluppati. Queste tendenze hanno permesso a paesi come la Cina e l'India di svilupparsi in maniera esponenziale in brevissimo tempo. Ad oggi invece, la tendenza politica preminente punta a spingere le aziende a riportare nei paesi d'origine la produzione per creare posti di lavoro e per evitare la perdita di altre competenze manifatturiere, cercando al contempo di rispondere alle nuove sfide ambientali, il cambiamento delle tendenze produttive è giustificabile con la crisi finanziaria che ha arrecato gravi danni alle economie statali ormai indifese proprio per la mancanza di un Prodotto Interno Lordo solido. Rispondendo alle nuove esigenze sostenibili la manifattura nazionale di un paese si pone come fonte di innovazione garantendo la competitività dei Paesi.

L'evoluzione dell'industria manifatturiera è passata attraverso diversi modelli, partendo dalla produzione artigianale alla produzione di massa e la "*lean production*" fino alla personalizzazione di massa.

Con la produzione artigianale ogni prodotto era frutto di una lenta e accurata lavorazione che portava a prodotti finiti unici uno dall'altro che rispecchiavano rispettivamente le richieste di un cliente, permettendo quindi un'ampia differenziazione. Tuttavia, i costi legati alla produzione erano elevatissimi proprio perché non esisteva un vero e proprio sistema di produzione, tutto era in mano a un artigiano.

Il progresso tecnologico ha poi portato alla produzione di massa che ha permesso la realizzazione di prodotti a costi più bassi attraverso l'implementazione di processi produttivi organizzata, a scapito però della varietà di prodotti. I processi produttivi della produzione di massa si basavano sulla catena di montaggio di Henry Ford. È stato grazie al boom economico post Seconda Guerra mondiale che la produzione di massa ha potuto sottolineare pienamente i suoi punti di forza in modo da raggiungere un picco di diffusione. La produzione di massa si basa su tre principi:

- **Intercambiabilità:** dato che le parti erano fabbricate in grandi volumi con tolleranze date in modo da ottenere effetti di volume economico, era possibile scegliere un'ampia gamma di parti tutte ugualmente utilizzabili, ciò era cruciale per il secondo principio;
- **La catena di montaggio :** introdotta da Henry Ford nel 1913, ha permesso la diffusione su larga scala delle automobili attraverso un processo in cui nella

fabbrica ogni dipendente svolgeva lo stesso compito reiteratamente, il che ha portato ad un significativo miglioramento della velocità e una riduzione dei costi di assemblaggio.

- **Divisione del lavoro** : è il terzo principio ed è il criterio alla base della catena di montaggio mobile, che ha parcellizzato il lavoro in modo che ogni lavoratore potesse concentrarsi su alcuni compiti ripetitivi specializzandosi.

Al contempo si sviluppava in Giappone il modello della *Lean Production*, che rispondeva alle necessità di produzione su larga scala tenendo in considerazione però la limitatezza delle risorse giapponesi. La lean production è nata all'interno della casa automobilistica Toyota e per tal motivo era conosciuto come *Toyota System production*. Come filosofia di gestione della produzione, si concentra sulla riduzione al minimo di tutti i tipi di rifiuti lungo la catena del valore aggiunto, massimizzando il valore per il cliente; inoltre è tutt'ora parte integrante di tutti i modelli produttivi (Jones, D.T., Ross, D. & Womack, J.P, 1990).

L'ultimo modello, la personalizzazione di massa, è nato alla fine degli anni '80, quando è aumentata la richiesta di differenziazione dei prodotti da parte dei clienti. Questo modello si fonda su tre principi:

- **l'architettura di famiglia**: alcune parti di un prodotto sono condivisi con altri prodotti mentre altre sono caratteristiche della specifica variante, la combinazione durante l'assemblaggio consente un'elevata personalizzazione del prodotto finale.
- **I sistemi di produzione riconfigurabili** : prerequisito per rispondere al mix di prodotti e alle richieste in continua evoluzione per cui i sistemi di produzione sono progettati per consentire un rapido adattamento della capacità produttiva, della funzionalità, della struttura e del controllo.
- **la differenziazione ritardata**: è una strategia per collocare il punto in cui i prodotti assumono le loro caratteristiche uniche il più possibile verso la fine del processo produttivo, in modo da ridurre i tempi di risposta del sistema produttivo e indirettamente ideare parti uniche della variante che siano meri dettagli facilmente individuabili dal consumatore che in questo modo sarà maggiormente attirato.

Il contro di questo modello sta nell'elevata complessità produttiva che compromette le prestazioni del sistema, soprattutto se paragonato alla produzione di massa. Oltre alla personalizzazione di massa, c'è una tendenza verso prodotti individualizzati o

personalizzati: tali prodotti possono avere fasi di lavoro e tempi di ciclo diversi, pertanto, non possono più essere limitati ai tempi statici delle linee di assemblaggio. Ad oggi le tendenze della domanda spingono verso prodotti con un impatto ambientale minimo, pertanto, la produzione sostenibile sta diventando progressivamente una risorsa chiave di molte aziende manifatturiere. Inoltre, diversi aspetti sociali influenzano la produzione, come ad esempio la progressiva urbanizzazione, richiedendo fabbriche che possano essere integrate nelle aree residenziali per essere più vicini sia ai lavoratori che ai clienti. Per questi motivi le imprese manifatturiere sono davanti alla sfida di cercare modelli produttivi che riescano a coprire le varie sfumature di sostenibilità: economica, ecologica e sociale. Dal punto di vista economico si richiede principalmente maggiore redditività della produzione. Da quello ecologico, un ridotto impatto ambientale della produzione, puntando a eliminare le emissioni dannose o auspicabilmente ad avere un'influenza positiva della fabbrica sull'ambiente circostante, ad esempio attraverso il miglioramento della qualità dell'aria e dell'acqua o producendo energie rinnovabili per alimentare la produzione, fungendo inoltre da deposito per l'energia in eccesso. Infine, dal punto di vista sociale, la fabbrica dovrebbe concentrarsi sull'apprendimento collaborativo e sullo sviluppo delle capacità umane. Per tale motivo è stata ipotizzata un modello di “fabbrica del futuro” che riesca a rispondere a tutte queste esigenze (Herrmann, C. et al. ,2014).

1.3.1 La Fabbrica del Futuro: Verso una produzione Sostenibile

Gli approcci moderni alla produzione, che prendano in considerazione la sostenibilità si concentrano principalmente sull'efficienza, ponendosi quindi come obiettivo la riduzione al minimo dei flussi di risorse e di energia in entrata, in modo da ridurre gli sprechi per arrivare ad azzerare le emissioni (Despeisse, M. et al. , 2012). Sebbene l'efficienza possa apparire come un buon approccio per la riduzione degli impatti ambientali, non è sostenibile a lungo termine, in quanto rimane comunque solo una strategia per la gestione delle emissioni che non porta a una produzione sostenibile ma solo a una produzione che gestita in modo sostenibile. La fabbrica del futuro deve orientarsi invece verso meccanismi che consentano ai materiali di mantenere il loro status di risorse, grazie alla riutilizzazione, aumentando contestualmente il loro valore intrinseco (“*upcycling*” della qualità). Questo approccio di eco-efficacia che materiali ed energia circolino a ciclo chiuso all'interno della fabbrica e un forte legame con l'ambiente esterno alla fabbrica. A

differenza dell'efficienza, l'approccio basato sull'efficacia funziona in modo simile a un sistema biologico, in cui i flussi di materiali servono come nutrimento biologico per i sistemi viventi e non esistono scarti (Ayres, R.U. & Simonis, U.E., 1994). Finora, questa visione è stata realizzata seppure non in modo definitivo attraverso le cosiddette simbiosi industriali all'interno dei parchi eco-industriali, di cui un esempio si trova a Kalundborg, in Danimarca. Quindi, l'influenza della fabbrica sull'ambiente sarà positiva: i rifiuti solidi saranno sfruttati e utilizzati per nuovi prodotti, le acque reflue saranno trattate e riutilizzate nel processo, le energie saranno prodotte in maniera rinnovabile e immagazzinate neutralizzando le emissioni. Questo approccio permette alla fabbrica di rispondere alle esigenze dell'urbanizzazione di avere fabbriche integrate nelle aree urbane così da ridurre il pendolarismo.

Per realizzare la fabbrica del futuro che non fa sprechi si rendono quindi necessarie delle infrastrutture adatte a rispondere sia alle esigenze di sostenibilità che a quelle della domanda, portando i modelli produttivi verso fabbriche altamente flessibili. Nello specifico tali necessità porteranno la concezione di edificio industriale ad evolversi in termini di flessibilità poiché strumentale per il processo di modifica dell'intero sistema fabbrica. In tal senso diventano determinati le condizioni della struttura primaria, ad esempio, la distanza tra le colonne portanti dell'edificio se elevata consente maggiori libertà di utilizzo e opportunità di modificare il sistema senza investimenti eccessivi che vanno a modificare la struttura base dell'edificio. Queste importanti proprietà dell'edificio devono essere considerate in fase di avviamento perché difficilmente modificabili in seguito, per questo limitano la flessibilità di un sistema di fabbrica a lungo termine. Gli approcci facilmente attuabili per raggiungere tale obiettivo possono essere la fabbrica modulare, la fabbrica in container, la fabbricazione all'interno di sistemi di trasporto (ad esempio, nave, treno) o la fabbrica in strutture gonfiate ad aria. (Herrmann, C. et al., 2014).

Inoltre, anche lo stesso edificio può avere un'influenza positiva sull'ambiente della fabbrica, ad esempio attraverso l'utilizzo di materiali da costruzione appropriati nella progettazione che permettano un più facile mantenimento della qualità dell'aria (Chen, J. & Poon, C. S., 2009), oppure la produzione integrata di energia, come il BIPV (*building-*

integrated photovoltaics), sostituendo gli impianti fotovoltaici tradizionali, consentendo maggiore autosufficienza degli impianti.

Per il miglioramento della produttività, la fabbrica del futuro, avrà anche la necessità di un nuovo approccio verso i TBS (*Technical Building Service*), cioè l'insieme di sistemi e infrastrutture strumentali all'attività produttiva come: elettricità, illuminazione, riscaldamento, e così via. Nella fabbrica del futuro tutti gli elementi del TBS saranno portati a collegati a un sistema di monitoraggio delle condizioni di produzione, che cercherà automaticamente di ottenere condizioni ottimali di input e output delle risorse. Così facendo sarà in grado di reagire rapidamente alle mutevoli esigenze derivanti dalla variabilità delle necessità inerenti all'output produttivo.

Oltre però gli aspetti più tecnici del processo industriale di primaria importanza sono i dipendenti perché necessari in tutte le fasi delle operazioni di fabbrica, dalla programmazione alle operazioni di produzione, controllo e riparazione.

Le capacità dei dipendenti devono essere utilizzate ma anche sviluppate, ad esempio utilizzando ambienti di apprendimento e formazione, in tal senso la tecnologia deve avere un ruolo di supporto adattandosi alle esigenze umane invece del contrario. L'innovazione tecnologica apre ad ampie possibilità in merito, tra il resto, alla mobilità per i dipendenti permettendo di lavorare ad esempio, da luoghi esterni alla fabbrica poiché tutte le informazioni rilevanti saranno disponibili ovunque e in qualsiasi momento.

Il processo d'innovazione della fabbrica del futuro porterà anche a una maggiore integrazione gli aspetti fisici al mondo virtuale implementando una rete di dispositivi interconnessi detti CPS (*Cyber-Physical Systems*), ad esempio con lo sfruttamento di sensori si potranno raccogliere ed elaborare informazioni sul processo in maniera più veloce e meno esosa, permettendo così l'implementazione continua di aggiustamenti che aumentano la produttività del complesso industriale. Inoltre, l'implementazione dei CPS potrebbe essere di supporto ai dipendenti fornendo loro informazioni raccolte in tempo reale dal sistema ed elaborate in modo tale da essere utilizzate per i compiti specifici.

La fabbrica del futuro si troverà quindi a gestire anche grandi quantità di dati, il che richiede la creazione di un "cloud di produzione" cioè un cluster di dati decentralizzato, che si occupi della raccolta ed elaborazione di tutte le informazioni provenienti dal

sistema di produzione, includendo: dati relativi alla produttività (come i tempi di lavorazione), all'energia e alle risorse (come la domanda di input energetico per macchina dell'impianto), informazioni relative al prodotto (come informazioni sulla qualità del prodotto) nonché lo stato di deterioramento di delle macchine della fabbrica. Questa idea è strettamente legata al concetto di Internet delle cose (IoT), introdotto negli anni '90 (Ash-ton, K.,2009), per cui tutti gli elementi fisici possiedono anche una rappresentazione virtuale in una struttura digitale. Questa visione di Fabbrica spesso definita *Smart Factory* comporta l'ulteriore vantaggio di poter sfruttare i dati raccolti per la previsione dei comportamenti futuri del sistema attraverso delle simulazioni digitali, a cui si aggiungono vantaggi in termini di trasparenza grazie alle funzioni di controllo chiave nel processo di miglioramento.

Infine, per quanto riguarda la formazione dei dipendenti prendono significativa importanza le Fabbriche di Apprendimento (chiamate anche *Teaching Factories*) che forniscono ambienti volti all'insegnamento a diversi gruppi target di dipendenti consentendo anche di comunicare e verificare le conoscenze teoriche nell'applicazione pratica. Una fabbrica di apprendimento può essere considerata a livello fisico comprendendo ad esempio le macchine, la logistica, l'energia o i flussi di informazioni, oppure a livello digitale includendo la pianificazione, modellazione e simulazioni. Questi due livelli sono interconnessi perché le soluzioni digitali possono essere testate, valutate e dimostrate nell'ambiente fisico di apprendimento.

Da diversi anni le Fabbriche dell'Apprendimento si sono affermate nella ricerca accademica, ma anche nell'industria e la fabbrica del futuro potrebbe sfruttare tale approccio a suo vantaggio. L'approccio descritto è molto vantaggioso soprattutto nelle regioni a basso livello d'istruzione poiché permette di sostenere lo sviluppo attraverso la condivisione e distribuzione di conoscenze utili ad aumentare l'occupazione nazionale e, a livello d'impresa, la produttività.

In conclusione, nel futuro non solo le fabbriche potranno, e dovrebbero, portare avanti la loro attività produttiva con un impatto ambientale nullo, ma addirittura positivo, comunque, in entrambi i casi, l'attività produttiva non ne risentirebbe in fatto di crescita, al contrario di come l'opinione comune suggerisce.

2. La relazione tra crescita industriale e ambiente

In questa sezione verrà analizzato il legame tra crescita industriale e ambiente. A partire dall'opinione comune che vede nella sostenibilità un limite alla crescita, saranno analizzate le potenziali criticità dei modelli che portano a tale conclusione, infine verranno anche esposte le opportunità e i limi della crescita.

2.1 Il trade-off tra ambiente e crescita industriale: le criticità dei modelli tradizionali di valutazione integrata

Gli effetti ambientali della crescita industriale ed economica già discussi nel primo capitolo stanno avendo un impatto significativo a livello globale e lo testimoniano le troppo frequenti catastrofi ambientali che includono: straripamento dei fiumi, uragani, caldo estremo o alluvioni. Per cui ad oggi prende un'importanza ulteriore analizzare il legame profondo tra la produzione industriale, e la sua crescita, con l'ambiente, dato che quest'ultima si configura come principale causa del rischio ambientale. Per analizzare il legame dal punto di vista ambientale, si possono sfruttare le azioni climatiche, termine che racchiude tutte le pratiche normative e gli investimenti sostenibili svolte dalle imprese e dalle istituzioni a favore dell'ambiente, ed esaminare il loro effetto sulla crescita di un paese. Ekins P. & Zenghelis D., nel loro articolo del 2021 "the cost and benefits of environmental sustainability", definiscono un approccio tradizionale alla crescita detto "*grow now, clean up later*", con cui danno adito all'opinione comune che vede nelle azioni climatiche, un costo eccessivo che vincola la crescita sul lungo termine. Tale considerazione è frutto di modelli economici standardizzati che analizzando le pratiche di sostenibilità cercano un equilibrio tra i costi da sostenere sul breve termine e i benefici che si otterrebbero nel futuro. Le conclusioni raggiunte da questi modelli presentato però delle criticità che erodono la solidità della tesi di incompatibilità tra crescita e sostenibilità, a titolo di esempio: l'applicazione di uno di questi modelli standardizzati ha portato sul tema dell'aumento della temperatura superficiale della terra una soluzione ottimale, da prendere in considerazione per le normative di controllo, di circa 3,5-4°C (Nordhaus,2018) di molto superiore rispetto a quella concordata dalle autorità nazionali durante gli Accordi di Parigi nel 2015 (che ponevano un limite tra 1,5 e 2°C), tale soluzione seppure ottima per la crescita porterebbe a un aumento significativo del rischio ambientale a cui l'essere umano e più in generale il pianeta si sottoporrebbe, per cui la soluzione non si può definire ottima in senso globale. Più nel dettaglio, i modelli utilizzati per raggiungere la conclusione già

citata sulla relazione tra azioni sostenibili e attività economica sono i cosiddetti “*integrated assessments models*” (IAMs) o modelli di valutazione integrata, definiti come rappresentazioni semplificate di sistemi fisici e sociali complessi con un focus, appunto sull’interazione tra attività economica e ambiente (IAMC,2023). Le criticità di questi modelli nascono dall’insita semplificazione, che presuppone 4 assunzioni principali (Stern,N. & Stigliz, J.E.,2023):

- **Assenza o limitazione del rischio:** i modelli IAMs spesso prendono in considerazione un mondo in cui il rischio è assente o molto limitato, in particolare la rappresentazione degli impatti negativi del cambiamento climatico vengono aggregati in una funzione che sottostima tali effetti.
- **Inefficienze di mercato condizionate:** l’unica inefficienza di mercato considerato è quello su cui i modelli si concentrano, cioè, l’esternalità negativa creata dalle attività d’impresa. Il resto dei fallimenti come quelli legati alle asimmetrie informative o ai comuni rischi di mercato, vengono ignorati.
- **Approcci di sconto non solidi:** quando vengono considerati i benefici delle pratiche sostenibili, questi vengono scontati e attualizzati con tassi di sconto frutto di approcci poco sensibili che portano a una puntuale sottovalutazione dei benefici futuri, così facendo si giustificano politiche meno rigide sulle emissioni.
- **Assenza di preoccupazioni distributive:** non vengono considerate le preoccupazioni distributive verso le generazioni future, ma anche verso quelle attuali.

Ognuna delle assunzioni crea delle crepe nel modello che risultano in una visione eccessivamente ottimistica rispetto agli effetti negativi del cambiamento climatico sulla crescita, così da ridurre l’importanza delle pratiche sostenibili e la valutazione sui benefici futuri che queste portano. Oltre a quelle legate alle assunzioni, possono essere evidenziate criticità per quanto riguarda gli scenari ipotetici (i.e. le fattispecie) e la formulazione degli obiettivi (Stern,N. & Stigliz, J.E.,2023). In primo luogo, per esaminare i difetti relativi agli scenari ipotetici utilizzati nel modello è utile considerare il caso-limite, in cui si tenga in conto che nessuna azione climatica verrà messa in atto, ed analizzare l’impatto sulla crescita. Ipotizzando una tale situazione i danni provocati dal cambiamento climatico, ad oggi stimati in un intervallo di valore che va tra i 19 e i 59 mila miliardi di dollari in tutto il mondo (Adnkronos, 2024), dovrebbero essere ripagati attraverso un incremento di spesa da parte sia delle persone che delle istituzioni nazionali, in tal modo viene erosa

sicuramente la crescita (perché limitata dalla minore disponibilità di capitali) e lo standard di vita, per cui spendere per azioni climatiche che hanno lo scopo di limitare tali danni si dimostra essere molto vantaggioso dato che da la possibilità di investire ciò che è stato risparmiato per la crescita. Quindi, migliore è la capacità di una società di mitigare i cambiamenti climatici maggiori saranno i benefici per la crescita.

Nei paragrafi che seguono è presentata un'analisi specifica delle criticità delle assunzioni, strumentale al rifiuto dell'ipotesi comune di incompatibilità tra protezione ambientale e crescita precedentemente citata basata sullo studio di Stern, N. & Stiglitz, J. E. (2023).

2.1.1 Prima assunzione: sottostima dei rischi

La prima assunzione posta dai modelli riguarda il rischio, in questi limitatamente o per nulla considerato. I sostenitori della tesi che sottostimano i benefici delle azioni climatiche minimizzano l'importanza del rischio asserendo che il mercato da solo riuscirebbe a gestirlo, ma ciò concerne che gli individui riescano a valutare in modo accurato il rischio e quindi che questo si rifletta sul prezzo di mercato. Le evidenze ad oggi esistenti rifiutano tale asserzione, confermando invece che il mercato è affetto da un soverchiante ottimismo irrazionale che porta a una mal valutazione ribassista del rischio rappresentato dal cambiamento climatico (Shiller, R. J, 2015). Il rischio climatico è da annoverare tra i cosiddetti rischi sistemati, ovvero i rischi che non dipendono dalle caratteristiche specifiche di un'impresa ma dalle condizioni esterne del mercato, come tale la sua stima prevede un significativo numero calcoli costosi che, ad oggi, si basano però su dati non completamente disponibili (Ranger, N., Mahul, O. & Monasterolo, I. 2021), quindi si deve riconoscere l'impossibilità di una corretta stima di tale rischio. A causa della suddetta impossibilità di una corretta stima, anche se il modello standardizzato fosse accurato nella determinazione dello scenario e i valori medi fossero accurati, ci sarebbe comunque alta variabilità dei risultati, dovuta proprio al rischio sistematico dei cambiamenti climatici. In sintesi, le conseguenze derivanti da una sottovalutazione del rischio collegato al cambiamento climatico risultano nella necessità per le imprese di investire capitale per la gestione e mitigazione di tale rischio, man mano che vengono utilizzate queste risorse si sostanzia una minore disponibilità di capitali da investire per la crescita dell'impresa e conseguentemente, dell'industria, mentre l'incremento dell'avversione al rischio

generata dalla variabilità del pericolo climatico avvalorata la tesi che l'attuazione di azioni climatiche potrebbe favorire la crescita.

2.1.2 Seconda assunzione: Inefficienze di mercato

Per i modelli IAMs non considerare altre inefficienze di mercato, oltre che le esternalità generate dal cambiamento climatico, vuol dire non valutare variabili chiave che descrivono riduzioni dell'efficienza, degli investimenti o dell'innovazione, quindi generando una riduzione della crescita, le azioni climatiche potrebbero in tal senso non solo ridurre gli effetti negativi di queste inefficienze favorendo la crescita, ma anche indurre azioni che permettono la riduzione della selezione avversa che a questa conduce. L'inefficienza occupazionale che nella realtà caratterizza la maggior parte delle economie mondiali non è considerata nei modelli IAMs, ciò porta a una considerazione difettosa sotto questo aspetto delle azioni climatiche: infatti, in uno stato che è caratterizzato da piena occupazione l'investimento di denaro in azioni climatiche porterebbe una riduzione nelle risorse disponibili per investimento o consumo, riducendo la crescita. Tuttavia, tale situazione è solo ipotetica, le evidenze scientifiche dimostrano che le economie nazionali operano usualmente ben al di sotto della piena occupazione (Domar, D. E., 1946). Per cui nella realtà si manifesta un “*mismatch*” tra i risparmi (calcolati a piena occupazione) e gli investimenti reali, questa differenza non porta alcun beneficio all'economia nazionale in termini di crescita, mentre lo farebbe se - per esempio - fosse investita in pratiche sostenibili a mitigazione del rischio ambientale, attraverso le quali si otterrebbe un contestuale beneficio per l'occupazione. Per cui, non considerando la globalità delle inefficienze di mercato i modelli standard mancano ulteriormente di variabili che potrebbero meglio stimare gli effettivi benefici delle azioni climatiche.

2.1.3 Terza assunzione: Approcci non solidi allo sconto

La critica principale che viene mossa in merito alla computazione dei modelli, che quindi influenzerebbe la percezione del legame tra ambiente e crescita è l'eccessiva attenzione al breve termine, questa risulta in una sottovalutazione degli investimenti e di conseguenza della crescita. L'impatto negativo sulla crescita si determina quando, ad esempio, sono mal valutati gli investimenti in ricerca e sviluppo che sul lungo termine porterebbero a un efficientamento sostenibile dei sistemi energetici quindi una crescita migliorata. La criticità principale dei modelli IAMs nello sconto dei flussi delle politiche di sostenibilità

si evidenzia nell'aggiustamento del tasso di sconto attuato, infatti, essendo tali politiche concepibili come delle assicurazioni contro il rischio climatico allora il tasso di aggiustamento dovrebbe essere negativo, o comunque, minore rispetto al tasso di interesse di mercato (tipicamente utilizzato). Considerando quanto detto la valutazione del modello inizia a prendere risvolti più concreti perché la relazione risultante descriverebbe una situazione in cui nel caso di rischio climatico elevato gli investimenti aumentano, al contrario di quanto generalmente succede nei modelli.

2.1.4 Quarta assunzione: gli effetti di distribuzione

Strettamente correlato agli altri tre, questo effetto riguarda la mancanza di attenzione da parte dei modelli IAMs sulla distribuzione del reddito nella generazione attuale. Il problema è significativo perché il cambiamento climatico colpisce molto più duramente i paesi e le popolazioni più povere in quanto meno resilienti al rischio climatico, la conseguenza all'assunzione di queste significative variabili nei modelli porta a conclusioni che suggeriscono l'adozione di azioni climatiche più forti che riducano l'iniquità e migliorando le condizioni di vita e favorendo le opportunità di crescita. L'argomento chiave che i sostenitori, dell'ipotesi tradizionale di incompatibilità tra crescita e sostenibilità evidenziano in merito giustifica la non considerazione di tali fattori sostenendo che se fossero davvero importanti le istituzioni avrebbero dovuto già correggerli, ma non sempre le istituzioni riescono a causa di possibili impedimenti dovuti ad esempio alla discussione pubblica sul clima. Inoltre, non sempre i leader politici seguono la logica economica quando al governo, ciò porta a strategia di policy che si concentrano sul breve termine che però auspicabilmente se influenzate dal cambiamento climatico porteranno a una migliore logica politica. In conclusione, la sostenibilità sta già influenzando la politica in molti paesi e lo farà sempre di più.

Queste conclusioni sui modelli di valutazione non sono mere asserzioni per affondare i suddetti metodi di calcolo ma uno spunto di riflessione per meglio comprendere l'effettiva funzionalità delle pratiche sostenibili e il loro possibile impatto positivo sulla crescita industriale.

2.2 Le opportunità di una crescita sostenibile

L'analisi svolta ha portato al rifiuto della superficiale tesi che vede nella sostenibilità niente più che un costo incompatibile con gli obiettivi di crescita. In questa sezione invece saranno descritte le principali opportunità che una strategia sostenibile può portare come beneficio alla crescita industriale ed economica di un paese. Innanzitutto, la crescita è favorita quando la produttività aumenta e un aumento di questa è dovuto a un utilizzo più efficiente delle risorse, ad oggi l'aumento della produttività in modo sostenibile gira attorno all'utilizzo delle risorse precedentemente considerate come scarti adesso vengono ritrattati e convertiti nuovamente in materie prime utili (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Nonostante il raggiungimento di un tale tipo di efficienza sia ancora lontano per alcuni settori, esiste una possibilità significativa di aumentare la loro efficienza semplicemente avvicinandole alla frontiera dell'efficienza implementando l'utilizzo di nuove tecnologie o pratiche migliori, ad esempio una migliore efficienza energetica si potrebbe tradurre in maggiore produttività che nutre la crescita industriale (Stiglitz, J. E. & Greenwald, B. C., 2014). L'ideazione ed utilizzo di nuove tecnologie apre l'opportunità a maggiori economie di scala, cioè una progressiva diminuzione dei costi di produzione man mano che le strategie d'impresa si avvicinano alla green economy, così come l'aumento della produttività nutre la crescita anche la riduzione dei costi impatta positivamente rendendo disponibili per le imprese maggiori fondi che potrebbero essere sfruttati per le attività di ricerca e sviluppo (R&S). Un indiretto ruolo hanno le città, intese nell'insieme dei loro sistemi energetici, terrieri, urbani e di trasporto, questi possono diventare più efficienti considerati sia singolarmente che come unico sistema cittadino. Il rischio climatico spinge verso città meno congestionate con trasporti pubblici efficienti, meno automobili con motore a scoppio in favore di automobili e altri veicoli elettrici o biciclette, rendendo in questo modo più salubre l'aria che comporta un miglioramento nelle condizioni di vita e infine un aumento della produttività. A ciò si aggiungono migliori pratiche d'uso del territorio che non inquinano fiumi o degradano il suolo o ancora distruggono ecosistemi comportandone di più robusti e fruttuosi con benefici positivi su tutti gli aspetti. Strumentale per la crescita è la percezione del rischio ambientale come un'urgenza condivisa e di breve termine, tale percezione apre a tante opportunità di coesione tra vari stati che portano a una riduzione dei costi e permettono di aumentare la produttività, così come quando durante la pandemia COVID-19 degli scorsi anni la necessità di vaccini ha

portato alla loro produzione e distribuzione in tempi brevi (sia per la distribuzione che per lo sviluppo e la produzione) e per grandi volumi quantitativi. Così come la pandemia la crisi climatica è una vera urgenza, difatti i costi si stanno progressivamente riducendo nei settori chiave (come la produzione di pannelli solari), portando a tassi di progresso sulle energie pulite più veloci rispetto alle fonti fossili (Way et al., 2022). La velocità di questi cambiamenti è sostenuta da un progressivo incremento del sostegno governativo. Nello specifico, se la visione urgenziale della crisi climatica è condivisa da più paesi e questi iniziassero ad utilizzare nuovi criteri nelle strategie politiche, d'investimento e di ricerca e sviluppo, aumenterebbe la fiducia della domanda aggregata degli investitori e dell'offerta di beni d'investimento incoraggiando ulteriori investimenti, da una parte infatti la maggiore domanda generatasi di soluzioni produttive verdi o infrastrutture sostenibili incentiva l'offerta a crescere riducendo i costi e spingendo verso maggiore innovazione. La visione di cooperazione tra gli stati deve però tenere in considerazione anche i paesi in via di sviluppo perché per quanto i paesi sviluppati si possano sforzare a ridurre le proprie emissioni, se questo non accade anche per i paesi in via di sviluppo o emergenti il cambiamento climatico procederà comunque in modo incessante. È però improbabile che i suddetti paesi in via di sviluppo riescano in autonomia a raggiungere tali obiettivi, per tal motivo all'interno dell'Accordo di Parigi sono stati inseriti degli obiettivi di coesione mondiale specifici che creino una rete di collaborazioni tra i paesi in via di sviluppo e quelli avanzati, in modo da favorire lo scambio di tecnologie, capitali e conoscenze. Se tali impegni verranno rispettati la crescita a livello globale sarà rafforzata grazie all'aumento della produttività anche nei paesi in via di sviluppo dovuto allo scambio di tecnologie, mentre il trasferimento di capitali genererà un miglioramento nell'efficienza dell'allocazione globale del capitale, con effetti anche qui per la crescita mondiale. C'è la possibilità che le dinamiche di cooperazione generino una corsa al ribasso in cui i comparti industriali di paesi alla ricerca di un vantaggio competitivo rispetto agli altri, rimanendo legati a strategie produttive inquinanti, ciò accade poiché nonostante sia ormai affermata l'opinione comune sull'economicità dei processi produttivi sostenibili, questa non è sempre riconosciuta. Per combattere tali comportamenti si renderanno quindi necessari degli interventi normativi come il Meccanismo di adeguamento del carbonio alla frontiera (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) (Commissione Europea, 2024), questa normativa impone delle tasse sulle emissioni di carbonio generate

durante la produzione dei prodotti che vengono importati all'interno della Comunità Europea. Il CBAM rende più costose le importazioni di beni prodotti in paesi in cui le normative ambientali sono meno severe, in tal modo disincentiva nei suddetti paesi la corsa al ribasso precedentemente citata, così facendo ottiene effetti positivi sia per i paesi della comunità che saranno incentivati a importare beni frutto di pratiche sostenibili, sia per i paesi emergenti che intenzionati a mantenere il flusso d'esportazioni saranno incentivati a modificare i processi produttivi rendendoli più compatibili con le pratiche sostenibili. In sintesi, la normativa tende a livellare le condizioni di mercato tra i produttori europei e non favorendo in tal modo la cooperazione che indebolisce gli incentivi ai comportamenti negativi rafforzando al contempo l'innovazione e favorendo gli investimenti, risultando in un mercato globale più ampio per i prodotti verdi.

2.3 Gli ostacoli alla crescita

Tra le criticità delle assunzioni dei modelli standard di valutazione si annovera la mancanza di una corretta considerazione delle varie inefficienze di mercato (o fallimenti di mercato) che interagiscono con il cambiamento climatico. Riconoscendo invece tali inefficienze si possono identificare quali siano i principali ostacoli a una crescita sostenibile ed inoltre concentrandosi su esse si possono trovare azioni per superarle o quantomeno limitarle. Si possono identificare alcuni di questi come fondamentali nella determinazione di impatti significativi sullo sviluppo, essi sono:

- **La concentrazione di Gas serra:** rappresenta la misura di concentrazione dei principali gas serra ed è un'esternalità negativa a causa dei danni che tali emissioni affliggono sugli altri;
- **Ricerca e sviluppo:** di per sé non rappresenta un'esternalità negativa , ma i vincoli a questa pratica determinano un grande limite all'innovazione e quindi allo sviluppo, annoverandosi tra le inefficienze di mercato;
- **Asimmetrie informative:** la mancanza di mercati delle informazioni completamente efficienti, cioè mercati in cui sono disponibili tutte le informazioni necessarie, porta da una parte a imperfezioni nei mercati di capitale e dei rischi ma anche poca consapevolezza di nuove tecnologie, pratiche, sussidi o incentivi a favore di uno sviluppo eco-compatibile, in tal modo limitando significativamente lo sviluppo.

Questi fallimenti di mercato sono molto significativi proprio per la capacità di causare delle inefficienze sia statiche, quindi in termini di allocazione in un dato periodo, che dinamiche cioè la inefficiente allocazione dei capitali in relazione al tempo, queste però se superate (anche non totalmente) possono contribuire alla lotta contro il cambiamento climatico e generare dei benefici per la crescita e altre dimensioni. Quelli identificati, in particolare, possono interagire tra di loro generando ancor più significative esternalità che si manifestano sotto varie forme, ad esempio l'incapacità di ottenere benefici completi dalle strategie di sostenibilità messe in atto. In particolare, le inefficienze della Ricerca e Sviluppo (R&S) sono in parte legate alle imperfezioni dei mercati del capitale e del rischio create dalle asimmetrie informative, e si manifestano soprattutto nel settore dell'innovazione che cerca di contrastare le emissioni di gas serra. Tuttavia, per combattere tali fenomeni possono essere messi in atto dai governi varie tipologie di interventi pubblici che incentivino o limitino comportamenti dannosi per il mercato e risultino in un miglioramento del benessere e della crescita. A prova di ciò esistono banche create dai governi al solo scopo di incentivare lo sviluppo combattendo la mancanza di capitale disponibile per gli investimenti in tale settore, riducendo il rischio di investimenti sostenibili anche nei paesi più poveri. Per raggiungere una migliore efficienza delle risorse è però necessario superare tali inefficienze: nel campo dell'informazione, ad esempio, sarebbe molto più facile per le famiglie isolare meglio le proprie case e sostituire le caldaie a gas con pompe di calore elettriche meno inquinanti se le istituzioni e autorità collaborassero per rendere tali investimenti meno complicati e meno costosi. Inoltre, anche realizzare rendimenti positivi nella produzione e nell'innovazione richiede spesso il superamento di queste inefficienze, grazie alla necessaria transizione verde industriale infatti le banche industriali sono state spinte anche alla risoluzione dei fallimenti di mercato che permettono insieme al resto un aumento della scala di produzione con i vantaggi ad esso collegati. Sebbene non sia possibile superare tutti i fallimenti di mercato significativamente impattanti sulla crescita e sul benessere si possono fare grandi miglioramenti nella gestione, riduzione e condivisione del rischio da essi rappresentati e la crisi climatica e la sostenibilità stanno fornendo un grande impulso in tal senso.

2.3.1 Le trappole sugli equilibri e la path dependance

La concretizzazione di tali inefficienze può portare alla manifestazione di due fenomeni negativamente impattanti per lo sviluppo sostenibile: trappole sugli equilibri ed elevata dipendenza dal “percorso” intesa come dipendenza dal *status quo*. A titolo di esempio se in un’ economia è messa in atto una scarsa quota d’investimenti in R&S, allora tale mercato non sarà sviluppato e competitivo, di conseguenza lo stesso investire diventa non conveniente, poiché le imprese non possono aggiudicarsi degli investimenti a costi contenuti. Tuttavia, se l’economia è florida e ci sono aspettative di crescita per il mercato degli investimenti, i benefici della R&S sono notevoli (Stiglitz, J. E.,1994). Le trappole di equilibrio di basso livello possono determinarsi quando le inefficienze di mercato, che si rafforzano reciprocamente, vanificano il conseguimento di rendimenti di scala crescenti e la “*path dependance*” si rafforza. Nonostante ciò, gli equilibri possono essere migliorati, spesso, non solo marginalmente, infatti, la potenziale presenza di trappole di basso livello per gli equilibri indica la contestuale possibilità che una serie di azioni pubbliche sufficientemente incisive potrebbe scatenare un allontanamento da tale fattispecie dannosa, verso un equilibrio diverso e migliore. La crescita nel nuovo equilibrio potrebbe risentirne in modo più che positivo, così come la transizione ecologica. Le economie in cui si manifestano problemi relativi alle trappole di equilibrio di basso livello presentano anche problemi relativi a eccessiva dipendenza dal percorso (*path dependance*), che si sostanzia nella dipendenza che un processo aziendale ha con la sua storia o una serie di decisioni e i risultati che esse hanno comportato (Oxford Reference,2024). In sostanza, le imprese conoscono meglio le tradizionali tecnologie inquinanti che hanno utilizzato fino a quel momento rispetto alle possibili soluzioni sostenibili che si pongono come alternativa, di conseguenza , sanno anche come meglio sfruttare le tecnologie tradizionali rispetto al loro corrispettivo, per tali vantaggi si sostanzia una sorta di inerzia verso l’innovazione che porta le imprese a non investire. Questo scenario si scontra contro lo sviluppo tecnologico e di conseguenza anche contro la crescita sostenibile, perché porta appunto i protagonisti industriali a investire maggiormente in tecnologie a basso potenziale tecnologico e inquinanti. Per questo motivo quando nuove tecnologie vengono messe sul mercato non prendono subito piede, rappresentando infatti solo una parte poco significativa nei processi industriali, nonostante questo una scoperta porta ad altre e nel frattempo cambiano i modi di pensare che portano all’apertura verso nuove opportunità, prima

impensate. Gradualmente il mercato ne comprende il potenziale e iniziano a crescere gli sfruttamenti di tali tecnologie innovative, di conseguenza si realizzano rendimenti di scala crescenti, si accumula esperienza, si fanno scoperte correlate che ne accelerano l'impatto sulla produttività e la produzione. Infine, però il ciclo innovativo si conclude tornando al punto di partenza, le nuove idee diventano obsolete, i guadagni derivanti dalla diffusione sono per lo più esauriti e le nuove scoperte in quei settori diminuiscono.

I detrattori della crescita sostenibile ritengono che se è vero che le tecnologie più sostenibili sono più produttive allora il mercato dovrebbe adottarle e infatti così è. Rimane però pacifico che nonostante l'innovazione rappresenti una grande opportunità, spesso è ostacolata dall'inerzia del mercato che limita le imprese a svolgere la transizione, ecco perché si rendono necessarie delle politiche nazionali che incentivino tali cambiamenti verso l'innovazione cercando di ridurre probabili inefficienze di mercato che riportano alle precedentemente citate trappole di equilibrio di basso livello.

In sostanza lo sviluppo sostenibile e la transizione ecologica nonostante rappresentino, come affermato da Fink, L. (2021) : cit. “la più grande opportunità di investimento dalla rivoluzione industriale”, rappresentano anche una sfida centrale per la politica economica che deve riuscire a sostenere e favorire il più possibile questo processo, in virtù dell'ormai eccessivo rischio climatico a cui l'essere umano è esposto.

3. Analisi empirica della relazione tra crescita industriale e ambiente

A questo punto si rende necessario, dato il crescente interesse che il tema del cambiamento climatico suscita a livello industriale, di analizzare empiricamente il legame tra crescita industriale e impatto ambientale. Per questo motivo si è proceduto prima a un'analisi regressiva con lo scopo di identificare l'effettiva relazione ad oggi empiricamente evidente tra le due variabili, successivamente a un'analisi di serie storiche per esaminare l'andamento e le dinamiche temporali della crescita industriale nel tempo.

Come già portato in evidenza nei capitoli precedenti, i modelli tradizionali di valutazione degli impatti sulla crescita delle componenti ambientali non riescono ancora a cogliere a pieno gli effetti di queste componenti. Nonostante ciò, l'analisi regressiva tradizionale e di serie storica rappresentano degli strumenti utili per identificare le fondamentali relazioni tra le variabili oggetto.

Ciò detto, l'obiettivo dell'analisi sarà indagare sulla natura degli effetti che la performance ambientale del settore manifatturiero europeo ha sulla crescita dello stesso.

In tal senso l'analisi ha previsto l'iniziale definizione di un campo di ricerca, che è stato appunto identificato nel settore manifatturiero europeo, espandendo in senso geografico la ricerca agli attuali 27 paesi componenti dell'Unione Europea, come verrà più avanti dettagliatamente specificato.

Successivamente si è poi proceduto ad analizzare, attraverso il software Rstudio, i dati raccolti. Il linguaggio Rstudio riveste una posizione di particolare rilevanza nell'analisi statistica, è ampiamente utilizzato poiché permette di analizzare, con facili input testuali, grandi dataset allo scopo di ricavarne modelli regressivi semplici o multipli, modelli di serie storica detti AR (*Autoregressive model*) ed anche grafici dettagliati che svolgono un ruolo chiave per l'analisi dei risultati. Per la parte dell'analisi statistica inferenziale sono stati costruiti due modelli di regressione multipla che prendono come variabile dipendente, cioè la variabile d'interesse, la crescita della produzione industriale e la produttività del lavoro. Una volta stimati, i modelli sono stati svolti i test diagnostici volti a verificare la significatività o meno delle variabili comprese.

Successivamente per la componente di analisi temporale sono state studiate le distribuzioni delle variabili principali dei modelli, in modo tale da verificare l'andamento di queste ultime e l'eventuale presenza di componenti stagionali o trend dal punto di vista grafico. Conseguentemente, sono state analizzate le serie storiche delle variabili, alla ricerca di dipendenze lineari e del *optimal lag*. L'intervallo di tempo considerato, prendendo come unità di tempo l'anno, va dal 2000 al 2023. Infine, è stato svolto un forecasting delle variabili d'interesse così da stimare gli andamenti futuri di tali variabili, il forecasting è stato svolto per i due anni successivi all'ultima data disponibile nel dataset, quindi, per il 2024 e 2025. Lo scopo di fare ciò è tentare di raccogliere informazioni sull'andamento futuro delle variabili raccogliendo al contempo ulteriori informazioni sulla relazione tra le variabili.

3.1 Costruzione del dataset e variabili d'interesse

L'analisi ha previsto una fase preparatoria in cui sono stati selezionati i dati necessari dai dataset disponibili su Eurostat, organo di ricerca statistica dell'Unione Europea, il cui obiettivo è la raccolta di dati nazionali economici e no, per la costruzione di statistiche.

Per la ricerca sono quindi stati selezionati tre tipi diversi di variabili: di crescita, ambientali e quelle che descrivono la situazione nazionale dell'industria. La ricerca sul primo tipo di variabili ha portato alla determinazione di quelle d'interesse, quella posta sul secondo tipo invece alla determinazione delle variabili target (o Covariate) sui cui l'analisi si concentra per la determinazione del legame crescita-ambiente, infine, la ricerca sull'ultimo tipo ha portato alla selezione di alcune variabili di controllo basate su statistiche nazionali, utili per tenere in conto le caratteristiche e le condizioni degli stati su cui l'analisi è stata svolta.

In merito a ciò i paesi selezionati nell'analisi sono i 27 componenti dell'Unione Europea (EUR-Lex, 2024):

- Belgio,
- Bulgaria,
- Repubblica Ceca,
- Danimarca,

- Germania,
- Estonia,
- Irlanda,
- Grecia,
- Spagna,
- Francia,
- Croazia,
- Italia,
- Cipro,
- Lettonia,
- Lituania,
- Lussemburgo,
- Ungheria,
- Malta,
- Paesi Bassi,
- Austria,
- Polonia,
- Portogallo,
- Romania,
- Slovenia,
- Slovacchia,
- Finlandia
- Svezia.

L'intervallo di tempo considerato, come precedentemente detto, va dal 2000 al 2023 con cadenza annuale. Chiarite le basi per la scelta delle variabili, nei prossimi paragrafi saranno analizzate nel dettaglio le variabili utilizzate e successivamente l'elaborazione dei dati ottenuti strumentale per l'analisi sul software Rstudio.

3.1.1 Indicatori di riferimento

La ricerca delle variabili guidata dai criteri già descritti ha portato all'identificazione di due variabili d'interesse, in accordo con l'obiettivo, queste sono la produzione dell'industria e la produttività del lavoro, mentre le altre variabili raccolte sono:

- PIL
- Popolazione
- Esportazioni
- Importazioni
- Investimenti fissi lordi (*Gross fixed capital formation*)
- Crescita della popolazione
- Occupazione
- Concentrazione totale di Gas serra nel settore manifatturiero

- Quota percentuale di rinnovabili sul consumo finale di energia
- Intensità energetica
- Produttività del lavoro (considerata anche come covariata)
- Produzione industriale (considerata anche come covariata)

3.1.2 Produzione nell'industria

I dati riguardo la produzione nell'industria sono stati raccolti dal dataset Eurostat : Production in Industry – Annual data , del database relativo alle Short-term business statistics (codice identificativo dataset: sts_inpr_a)⁷. I dati sono stati raccolti relativamente al solo settore manifatturiero e visualizzati come percentuale di crescita rispetto al periodo precedente (trattandosi di dati annuali rappresenta la crescita annuale), rispettando inoltre i criteri geografici e storici dei dati determinati all'inizio. Questa variabile è di significativa importanza, in quanto la variabile d'interesse di uno dei due modello cross-section stimati. Eurostat calcola l'indice di produzione industriale tenendo in considerazione: il Valore aggiunto a prezzo base, calcolandolo a partire dal turnover, aggiungendo la produzione capitalizzata, gli altri ricavi operativi, le variazioni nel prezzo delle azioni e sottraendo la spesa d'acquisto per beni e servizi necessari alla produzione, insieme con la quota di tassazione sui prodotti. La crescita è calcolata come segue:

$$\Delta Prod\% = \frac{Prod_{t+1} - Prod_t}{Prod_t} * 100 \quad (1)$$

3.1.3 PIL e Popolazione

Queste due variabili provenienti rispettivamente dai dataset: nama_10_gdp⁸ e nama_10_pe⁹, non sono state utilizzate direttamente nell'analisi poiché sono invece serviti per la computazione di una variabile di significativa importanza cioè il PIL pro capite. Nello specifico l'indicatore del PIL è stato raccolto con cadenza annuale calcolato a prezzi correnti (espresso in milioni di euro), mentre l'indicatore della popolazione è stato considerato raccogliendo i dati in migliaia di persone. Il PIL pro-capite è molto utile per

⁷ Production in Industry – Annual data, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/sts_inpr_a/default/table?lang=en&category=sts.sts_ind.sts_ind_prod

⁸ GDP and main components (output, expenditure and income), Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_gdp_custom_10432051/default/table

⁹ Population and employment, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/nama_10_pe_custom_10432092/default/table

descrivere la situazione di sviluppo economico di un paese, la quale influenza la produzione industriale del paese. Pertanto, questa componente è necessaria nel modello per descrivere nella maniera migliore la crescita industriale in un paese.

L'indicatore è stato calcolato come:

$$PIL \text{ pro capite} = \frac{PIL_t}{POPL_t} \quad (2)$$

3.1.4 Esportazioni e Importazioni

Anche esportazioni e importazioni non sono state utilizzate direttamente per l'analisi queste, provenienti dallo stesso dataset Eurostat (nama_10_exi)¹⁰, sono state considerate a prezzi correnti in milioni di euro. L'utilità di questi indicatori sul modello è rappresentare i flussi di prodotti in ingresso e in uscita da un paese, per questo motivo nell'analisi non sono state considerate singolarmente, ma come somma, determinando quindi la misura del totale dei flussi. Rappresentare i flussi in entrata e uscita da un paese serve a capire quanto la produzione industriale sia influenzata dal mercato globale, non aggiungerli significherebbe sorvolare sulle interazioni internazionali tra i paesi. L'effetto economico che le esportazioni hanno sulla produttività industriale è positivo, infatti, un aumento delle esportazioni è indicativo per un'alta domanda di prodotti o servizi a livello internazionale, il che può stimolare la produzione industriale portando a una crescita della suddetta. Il calcolo dei flussi di esportazioni e importazioni è stato calcolato come:

$$Flussi \text{ commerciali} = EXP_t + IMP_t \quad (3)$$

3.1.5 Investimenti fissi lordi (*Gross Capital Formation*)

Questo indicatore proviene invece dal dataset Eurostat: tipsna20¹¹. L'indice è misurato in milioni di euro e rappresenta l'investimento in risorse fisiche come: macchinari, attrezzature, infrastrutture ed edifici fatti dalle imprese. Questi investimenti sono significativi nella produzione industriale, un alto livello d'investimenti di questo genere, infatti, indica che in quel determinato paese le imprese stanno investendo in modo significativo nell'implementazione della capacità produttiva. Gli investimenti in risorse fisiche possono quindi aumentare la produttività industriale con l'adozione di nuove tecnologie più

¹⁰ Exports and imports by Member States of the EU/third countries, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_exi_custom_10432172/default/table

¹¹ Gross fixed capital formation at current prices, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tipsna20_custom_10432596/default/table

avanzate ed efficienti, in tal modo impattano positivamente anche sulla crescita industriale. Quindi, inserire questo indicatore nel modello permette di includere una prospettiva sull'innovazione della capacità produttiva, facendo ciò si tiene in considerazione il possibile effetto che un'ampia quantità di investimenti in tecnologie sostenibili avrebbe sulla produzione e sulla crescita. A titolo di esempio, nel caso in cui ci fosse un alto livello di investimenti in risorse fisiche sostenibili: ciò renderebbe più competitive le imprese contro le esose normative ambientali, favorendo la crescita.

3.1.6 Crescita della popolazione

La crescita della popolazione si annovera tra le variabili nazionali scelte per la migliore comprensione della situazione degli stati europei, questo indicatore è stato raccolto dal dataset: `nama_10_pe`¹², dove è misurata come crescita percentuale sull'anno precedente. La crescita della popolazione influisce direttamente sulla domanda di beni e servizi, di conseguenza, stimolando le imprese a produrre di più per soddisfare le esigenze della popolazione in crescita. L'effetto generato dall'espansione demografica può inoltre influire sull'espansione delle infrastrutture urbane come case, ospedali o strade, generando un aumento della domanda di materiali da costruzione o di attrezzature strumentali a tali attività. Pertanto, l'effetto dell'espansione demografica non stimola le imprese solo con l'aumento delle esigenze di prodotti finiti, ma anche con l'aumento della domanda di materiali da costruzione o attrezzature. D'altro canto, un aumento della popolazione porta per le imprese anche l'opportunità di aumentare la forza lavoro, a favore di una migliore produttività. Includere questo indicatore nel modello è perciò necessario a catturare nella stima della crescita industriale, anche questi effetti. La formula con cui sono calcolati i dati di questo indicatore è:

$$\Delta POPL\% = \frac{POPL_{t+1} - POPL_t}{POPL_t} \quad (4)$$

¹² Population and employment, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/nama_10_pe_custom_10432117/default/table

3.1.7 Occupazione

L'occupazione è un'altra delle variabili fondamentali per comprendere la situazione di domanda e offerta nazionale del settore manifatturiero. Il dataset utilizzato per inserire questo indicatore è nama_10¹³ ed è basato sul totale delle persone impiegate in attività produttive all'interno dei confini nazionali. Innanzitutto, l'occupazione misura la disponibilità di forza lavoro per le imprese, input fondamentale per la produzione. Come già detto in merito alla crescita dell'occupazione, maggiore forza lavoro da l'opportunità alle imprese di aumentare produttività ed efficienza. Inoltre, l'occupazione influisce sul potere d'acquisto della popolazione, in particolare, un aumento dell'occupazione porterebbe le famiglie ad avere maggiori disponibilità di redditi stabili aumentando la domanda di prodotti, ciò stimola la produzione industriale impattando quindi anche sulla crescita. D'altra parte, l'occupazione è anche spesso associata della situazione economica di un paese, più è alta, maggiore è la stabilità economica, la quale crea un ambiente favorevole per gli investimenti e la crescita.

3.1.8 Concentrazioni di Gas Serra

Questo indicatore, necessario come componente ambientale per l'analisi della relazione tra crescita e ambiente, è stato selezionato dal dataset Eurostat: sdg_13¹⁴. L'indicatore misura le emissioni totali di un grande numero di gas serra, tra cui i cosiddetti Kyoto basket of greenhouse gasses cioè i sei gas serra principali regolamentati dal Protocollo di Kyoto in vigore dal 1997. I sei gas serra compresi nel Kyoto basket sono prendono un'importanza ulteriore rispetto agli altri per il loro potenziale inquinante, cioè per il loro contributo all'effetto serra. Nello specifico i sei gas serra principali sono: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido d'azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC), esafluoro di zolfo (SF₆). La misura delle emissioni riguarda tutti i settori includendo anche l'aviazione, mentre l'unità di misura utilizzata è tonnellate per capita. Il ruolo di questo indicatore è fondamentale per comprendere il legame tra la crescita e l'ambiente. Permettendo di stimare un coefficiente che definisca la relazione suddetta, da

¹³ Population and employment, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/nama_10_pe_custom_10432117/default/table

¹⁴ Net greenhouse gas emissions, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/sdg_13_10/default/table

la possibilità a partire da questo di dedurre quale sia l'effetto che un aumento o una diminuzione delle emissioni ha sulla crescita industriale. Infatti, nel caso di un coefficiente positivo, vorrebbe dire che l'aumento delle emissioni è principalmente legato all'aumento della produzione industriale, che genera un incremento positivo della crescita.

3.1.9 Quota percentuale delle fonti rinnovabili sul consumo di energia finale

L'indicatore fa parte del dataset `nrg_ind_fecf`¹⁵, e misura la percentuale di energia prodotta in un anno da un determinato tipo di fonte, in particolare per la costruzione del modello è stata utilizzata la quota di energie rinnovabili questo perché tale quota è un indicatore chiave della sostenibilità di un paese. Un'alta percentuale di rinnovabili, infatti, indica che quel determinato paese stia progredendo significativamente nella riduzione di gas serra, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili. L'effetto probabile sulla produzione industriale è positivo, perché le fonti rinnovabili stabilizzano i costi energetici riducendo l'esposizione dalle variazioni dei prezzi dei combustibili fossili. Questa variabile è stata inclusa nel dataset analitico poiché dà l'opportunità di analizzare una componente ambientale che descrive il processo di transizione ecologica statale e industriale. I risvolti sulla crescita industriale dovuti alla transizione ecologica sono già stati discussi ampiamente nei capitoli precedenti, tuttavia, in breve si possono identificare due vantaggi principali: la maggiore competitività data dalla riduzione (o stabilizzazione) dei costi energetici e lo stimolo all'innovazione a cui le imprese che investono in tecnologie energetiche sostenibili sono sottoposte. La misura della quota è calcolata in questo modo:

$$\text{Quota rinnovabili \%} = \frac{\text{Totale consumo energetico di rinnovabili}}{\text{Totale consumo energetico di tutte le fonti}} * 100 \quad (5)$$

3.1.10 Intensità Energetica

L'intensità energetica (dataset : `nrg_ind_ei`)¹⁶ misura la domanda energetica di un paese, calcolandolo come rapporto tra unità di energia per unità del PIL. Solitamente, viene utilizzato come approssimazione dell'efficienza energetica riflettendo vari fattori, tra cui il

¹⁵ Share of renewable energy in gross final energy consumption by sector, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_40/default/table

¹⁶ Energy intensity, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_ei_custom_11218007/default/table

ciclo economico, gli standard di vita o la situazione ambientale nel paese. Per cui, un valore più basso di questo indicatore potrebbe identificare un aumento della produzione e quindi del PIL in comunione con una maggiore efficienza d'uso dell'energia. Ciò è importante perché un'alta efficienza energetica legata strettamente con un miglioramento dell'uso sostenibile dell'energia, apre l'opportunità per le imprese di ridurre i costi, migliorandone la competitività. Per questo motivo, l'intensità energetica è stata scelta come componente ambientale da aggiungere al modello.

3.1.11 Produttività del lavoro

Questo indicatore è frutto del dataset `nama_10_lp_a21`¹⁷ e mira ad analizzare l'uso del lavoro nella produzione. È misurata sul settore manifatturiero come rapporto in termini reali tra l'output produttivo e l'input di lavoro, la produttività del lavoro riflette la capacità dei lavoratori di produrre più o meno output in meno o più tempo. In presenza di alti livelli di produttività i lavoratori riescono a produrre più output in meno tempo, di conseguenza, incrementando l'efficienza delle imprese e permettendogli di ridurre i costi sfruttando le economie di scala. Questa variabile riveste un ruolo significativo nell'analisi perché permette di considerare l'effetto che il cambiamento climatico, così come le pratiche di sostenibilità, ha sui lavoratori e di conseguenza sulla produzione. Infatti, nel caso di adozione di tecnologie e pratiche sostenibili, i processi produttivi diventano più efficienti per le migliorate condizioni lavorative dei dipendenti dell'impresa, portando a una crescita industriale sostenibile. Per il forte, seppur indiretto, legame con la crescita industriale, questa variabile è stata altresì utilizzata come variabile dipendente nella stima di un modello che potesse rispondere in modo consono all'obiettivo dell'indagine. La formula con cui l'indicatore è presentato nel dataset è:

$$\Delta Prod_{lav} \% = \frac{Prod_{lav}_t - Prod_{lav}_{t-1}}{Prod_{lav}_{t-1}} * 100 \quad (6)$$

¹⁷ Labour productivity and unit labour costs at industry level, Eurostat, 2024. Link: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_lp_a21_custom_10582163/default/table

3.2 Elaborazione dei Dati

I dati raccolti hanno subito, prima di essere analizzati un processo di elaborazione che li portasse ad essere adatti per l'analisi sul software Rstudio. In particolare, a tutti i dati provenienti dai dataset Eurostat sono stati sottoposti al seguente processo.

Attraverso il software Microsoft Excel, sono state preventivamente controllate le serie storiche di ogni componente, nel caso una variabile presentasse la mancanza di un anno, come successo per esempio per la concentrazione di gas serra, sfruttando la tecnica del *Forward looking*, è stata utilizzata la media dei cinque anni precedenti per il calcolo dell'anno mancante.

Una volta assicuratosi che tutte le variabili fossero pari in termini di serie storica, si è proceduto alla creazione di un dataset unico computando per ogni anno (per ogni componente selezionata) la media dei dati relativi a tutti i paesi.

Alla fine, si è così ottenuto un dataset integrato di tutte le variabili che, per ogni dato, prende in considerazione la media aritmetica dei paesi creando un'informazione a livello "europeo". Le medie aritmetiche sono state organizzate nel dataset in base all'anno a cui le osservazioni fanno riferimento. Tuttavia, il dataset presentava ancora la necessità di alcune elaborazioni, in particolare, per le variabili che identificavano i flussi commerciali internazionali (Importazioni ed Esportazioni), la formazione lorda di capitale fisso e l'occupazione, è stato calcolato il logaritmo naturale tra un anno e il seguente ,così da avere delle misure di crescita delle tre variabili. La formula utilizzata è la seguente (tra parentesi come la formula è stata espressa su Excel):

$$LN (Log) = \frac{Variabile_{t+1}}{Variabile_t} \quad (7)$$

3.3 Analisi preliminare

Una volta inseriti all'interno del software si è proceduto a un'analisi preliminare dei dati, necessaria per verificare la presenza di multicollinearità tra le variabili. La necessità di questa verifica viene giustificata dalle assunzioni dei modelli di regressione, dette *Least Square Assumption* o dei minimi quadrati, tra le altre infatti è presente l'assunzione di

No Perfect collinearity, per cui un modello è valido se non sono presenti stringenti correlazioni tra due o più variabili. La correlazione è l'indice attraverso cui si verifica la multicollinearità ed anche quello attraverso cui nell'analisi svolta sono state selezionate le variabili plausibili. Per calcolare la correlazione tra due variabili si utilizza questa formula:

$$Corr(x_i, y_i) = \rho_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

Il criterio di scelta per la selezione delle variabili prevede inoltre che la correlazione debba essere compresa entro il seguente limite:

$$\rho_{x,y} \leq |0.8|$$

Applicando le formule adatte del software si è ottenuta la seguente matrice di correlazione:

	Prod_Ind	Pilcapita_Ind	Flows_Ind	Gfcf_Ind	Pop-growth_Ind	Employ_Ind	Ghg_Ind	En-ergy_Int_Ind	Renenergy_Final_Ind	Prod_Lav
Prod_Ind	1	-0.05227042	-0.2595465	-0.05057638	-0.31403602	-0.09578641	0.28769859	0.1397999	-0.1556651	0.8049401
Pilcapita_Ind	-0.05227042	1	0.9154158	0.97994082	0.35497759	0.97202994	-0.8434293	-0.9608629	0.9342635	-0.2984521
Flows_Ind	-0.25954653	0.9154158	1	0.85164851	0.2408308	0.85576875	-0.90301153	-0.9621324	0.9762546	-0.4286774
Gfcf_Ind	-0.05057638	0.97994082	0.8516485	1	0.46391073	0.99254808	-0.76233571	-0.9208676	0.8699001	-0.3144521
Popgrowth_Ind	-0.31403602	0.35497759	0.2408308	0.46391073	1	0.46779054	-0.06148895	-0.2588689	0.1947876	-0.3506673
Employ_Ind	-0.09578641	0.97202994	0.8557687	0.99254808	0.46779054	1	-0.76114632	-0.9205693	0.8708141	-0.3418557
Ghg_Ind	0.28769859	-0.8434293	-0.9030115	-0.76233571	-0.06148895	-0.76114632	1	0.8810625	-0.9013066	0.371235
Energy_Int_Ind	0.13979987	-0.96086295	-0.9621324	-0.9208676	-0.25886892	-0.92056929	0.88106249	1	-0.9804561	0.353868
Renenergy_Final_Ind	-0.15566515	0.93426349	0.9762546	0.86990012	0.19478759	0.8708141	-0.90130657	-0.9804561	1	-0.3144241
Prod_Lav	0.80494015	-0.29845205	-0.4286774	-0.31445206	-0.3506673	-0.34185571	0.37123496	0.353868	-0.3144241	1

Tabella 3.1: Matrice delle Correlazioni tra le variabili selezionate

La matrice delle correlazioni porta dei risultati significativi per le variabili d'interesse produzione dell'industria e produttività del lavoro che non risultano determinare correlazioni oltre il limite fissato del 80% con nessuna delle variabili. In seguito per l'effettiva selezione delle componenti del modello si è tenuto in considerazione della variabile target, cioè la concentrazione di gas serra, poiché quest'ultima è strettamente necessaria per

garantire la coerenza del modello con l'obiettivo. Tenendo in considerazione tale variabile è risultato che i seguenti indicatori sono gli unici ammissibili per la costruzione di un modello di regressione multipla (per quanto riguarda la produzione dell'impresa e la produttività del lavoro, esse sono presenti in questo elenco poiché considerate anche come covariate):

- Pil pro capite
- Formazione lorda di capitale fisso
- Crescita della popolazione
- Occupazione
- Intensità Energetica
- Produttività del lavoro
- Produzione dell'industria

3.4 Stima dei modelli di Regressione

A questo punto, selezionate le variabili potenziali per la costruzione del modello di regressione, si è proceduto alla stima attraverso le funzionalità del software Rstudio del modello di regressione multipla che migliore possibile per entrambe le variabili.

I modelli di regressione multipla stimati hanno l'obiettivo di fare inferenza sulle componenti indipendenti per studiare come una variazione di queste ultime influenze la distribuzione delle variabili d'interesse.

Il modello standard di Regressione multipla si presenta come segue:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_n x_{ni} \quad (9)$$

I coefficienti β detti di regressione sono gli indici stimati che rappresentano la relazione della variabile ad essi sottostante con la variabile dipendente d'interesse. Nel considerare tali coefficienti, essi si possono interpretare in due modi differenti: se si parla dell'intercetta (β_0), essa rappresenta il valore atteso della variabile dipendente nel caso in cui tutte le variabili indipendenti siano pari a zero, mentre tutti gli altri coefficienti (β_i), rappresentano il valore atteso della variabile dipendenti nel caso di una variazione unitaria della variabile indipendente.

Ciò detto, per la stima dei modelli di regressione relativi all'analisi in questione si è proceduto a un'iterazione di varie combinazioni delle variabili potenziali alla ricerca del modello con robustezza più alta. Gli output qui sotto rappresentano i modelli migliori:

```
Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q      Max
-6.2417 -0.4017  0.2795  0.9187  3.2244

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -62.0654   13.0129  -4.770  0.0001 ***
pilcapita_ind  0.8489    0.1687   5.033  0.0001 ***
prod_lav      0.7959    0.1343   5.926  0.0000 ***
popgrowth_ind -11.9875    3.5342  -3.392  0.0031 **
ghg_ind       4.7295    1.0711   4.416  0.0003 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.012 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8496, Adjusted R-squared:  0.818
F-statistic: 26.84 on 4 and 19 DF, p-value: 0.0000
```

```
Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q      Max
-3.0536 -1.3160  -0.1543  0.5641  5.5065

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   38.5635   17.4027   2.216  0.0391 *
pilcapita_ind -0.5611    0.2268  -2.474  0.0230 *
prod_ind       0.8153    0.1376   5.926  0.0000 ***
ghg_ind       -2.6559    1.4177  -1.873  0.0765 .
popgrowth_ind  5.6240    4.3447   1.294  0.2110
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.036 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7586, Adjusted R-squared:  0.7078
F-statistic: 14.93 on 4 and 19 DF, p-value: 0.0000
```

Gli output di cui sopra mostrano la composizione dei modelli stimati, in particolare, nella parte superiore sono riportate alcune statistiche di base quali: massimo e minimo, primo e terzo quartile e la mediana. Proseguendo nell'analisi dell'output sono presentati i coefficienti di regressione stimati (Estimate) e gli errori standard ad essi correlati (Std. Error), entrambi funzionali per il calcolo della tre statistica mostrata la statistica test (t value) utilizzata per i test di significatività. L'ultima statistica mostrata è il p-value (Pr>|t|), indicatore successivamente analizzato che da informazioni in merito alla significatività della variabile associata. Infine, nella parte inferiore dell'output sono presenti varie statistiche per l'analisi di robustezza e significatività del modello: il

coefficiente di regressione adjusted o *Adjusted R-squared* (\bar{R}^2) e l' F-test o *F-statistic* (con il relativo p-value). I modelli ottenuti sono speculari rispetto alle variabili d'interesse e una covariata, infatti, nel primo modello la variabile dipendente è la produzione industriale e tra le covariate compare la produttività del lavoro, nell'altro viceversa. Mentre per le altre covariate compaiono le stesse: PIL pro capite, crescita della popolazione e concentrazione dei gas serra. I modelli scritti sfruttando i coefficienti stimati sono:

$$\Delta Prod\% = \underbrace{-62.065}_{intercetta} + \underbrace{0.849x_{1i}}_{Pil\ pro\ capite} + \underbrace{0.796x_{2i}}_{produttività\ del\ lavoro} - \underbrace{11.988x_{3i}}_{crescita\ popolazione} + \underbrace{4.730x_{4i}}_{conc.\ gas\ serra}$$

$$\Delta Prod_{lav}\% = \underbrace{38.563}_{intercetta} - \underbrace{0.561x_{1i}}_{Pil\ pro\ capite} + \underbrace{0.815x_{2i}}_{produzione\ ind.} - \underbrace{2.656x_{3i}}_{conc.\ gas\ serra} + \underbrace{5.624x_{4i}}_{crescita\ popolazione}$$

3.4.1 Test di significatività e Bontà d'adattamento

I test di significatività sono strumenti statistici che permettono di verificare se i dati ottenuti, in questo caso i coefficienti stimati del modello siano, dal punto di vista statistico, significativi, cioè la prova che quel coefficiente abbia o meno una relazione statisticamente valida con la variabile dipendente (oltre che fornire il grado di significatività della relazione). Per fare ciò vengono imposte delle ipotesi che a seconda dei risultati del test verranno accettate o rifiutate, le ipotesi imposte nell'analisi condotta sono:

$$\begin{cases} H_0: \beta_k = 0 \rightarrow non\ significativo \\ H_1: \beta_k \neq 0 \rightarrow significativo \end{cases}$$

Le ipotesi così poste caratterizzano il test, che prende la denominazione di bidirezionale. Rstudio per il calcolo della significatività dei coefficienti sfrutta il p-value, cioè il livello di significatività minore, sotto l'ipotesi nulla, secondo cui la stima del parametro di regressione è differente dal valore ipotizzato. Le ipotesi poste in un test di significatività che sfrutta il p-value sono le stesse, ma, la regione critica e quella di accettazione che determinano la soluzione al test differiscono dalla formulazione tradizionale, esse sono così determinate:

$$\begin{cases} R.A : p - value \geq \alpha \rightarrow Accetto\ l'ipotesi\ nulla \\ R.C : p - value < \alpha \rightarrow Rifiuto\ l'ipotesi\ nulla \end{cases}$$

La variabile α identifica la sicurezza del test, nello specifico si definisce come la probabilità di commettere un errore di primo tipo, cioè rigettare l'ipotesi nulla quando invece è vera. In tal senso, risulta utile per la lettura del output è identificare quali sono i codici visivi di Rstudio per l'indicazione dei livelli di significatività:

$$\begin{aligned} \alpha = 0 &\rightarrow " *** " \\ \alpha = 0.001 &\rightarrow " ** " \\ \alpha = 0.01 &\rightarrow " * " \\ \alpha = 0.05 &\rightarrow " . " \end{aligned}$$

Per quanto riguarda i modelli ottenuti, questi presentano alti livelli di significatività per quasi tutte le variabili, in particolare:

- **Per il modello della produzione industriale:** quasi tutti i coefficienti di regressione, inclusa l'intercetta sono significativi a un livello di significatività pari a 0, cioè una sicurezza massima sulla significatività del coefficiente. L'unico coefficiente che ha una significatività minore è la crescita della popolazione, con un livello di significatività pari a 0.001, quindi una sicurezza del 99.99%.
- **Per il modello della produttività del lavoro:** i livelli di significatività sono minori, in particolare, solo 4 dei 5 coefficienti sono significativi. Nello specifico, l'intercetta e il PIL pro capite sono significativi al 99% (livello di significatività dello 0.01), la produzione industriale invece è significativa al 100% (livello di significatività pari a 0), infine la concentrazione di gas serra è significativa al 95% (livello di significatività pari a 0.05). Nel modello la crescita della popolazione non identifica una variabile significativa, nonostante ciò, è stata mantenuta per favorire la robustezza del modello.

Inoltre, l'output Rstudio fornisce delle informazioni sulla bontà d'adattamento e la significatività del modello nel suo intero. Partendo dalla bontà d'adattamento, questa indica la validità di un modello attraverso vari indici quali: coefficiente multiplo di regressione,

errore standard di regressione (SER) o l'errore quadratico medio sotto radice. Nell'output è fornito il coefficiente multiplo di regressione aggiustato per entrambi i modelli, questo indice è leggermente diverso dal semplice coefficiente multiplo di regressione standard, perché riesce a depurare la misura sull'indice dall'eccesso di informazioni di una regressione multipla attraverso la ponderazione dei gradi di libertà del modello. In questo modo si ottiene un indice più adatto, per la regressione multipla, alla misura della percentuale spiegata della variabilità della componente dipendente, da parte del modello di regressione. Tale misura chiamata robustezza del modello è una delle informazioni principali e primarie che si utilizzano per la valutazione di un modello di regressione multipla. Nella prassi comune sono stabilite delle soglie sui valori del coefficiente e ad ogni soglia è legata una valutazione del modello, di seguito una rappresentazione di tali soglie:

$$\begin{aligned}
 R^2 o \bar{R}^2 \leq 30\% &\rightarrow \text{non robusto} \\
 30\% \leq R^2 o \bar{R}^2 \leq 50\% &\rightarrow \text{sufficientemente robusto} \\
 R^2 o \bar{R}^2 \geq 50\% &\rightarrow \text{robusto}
 \end{aligned}$$

I modelli considerati nell'analisi empirica, riportano dei coefficienti entrambi maggiori al 50%, portando quindi a considerarli robusti, in particolare, i risultati dei due modelli sono:

- **Modello della produzione dell'industria:** *Adjusted R-squared* pari a 81.8%
- **Modello della produttività del lavoro:** *Adjusted R-squared* pari a 70.8%

Successivamente l'output permette di valutare la significatività del modello attraverso il cosiddetto F-test, il quale attraverso la costruzione di un set di ipotesi congiunte su restrizioni multiple, permette appunto di testare la significatività di tutti i coefficienti di regressione del modello congiuntamente. Il processo di test della significatività attraverso l'F-test dell'intero modello parte dalla definizione della statistica test:

$$F - test: \frac{(R_{UR}^2 - R_R^2)/q}{(1 - R_{UR}^2)/(n - k_{UR} - 1)} \text{ con } q = k_{UR} - k_R \quad (10)$$

Come mostrato da (10) si fa riferimento a due coefficienti di regressioni diversi un cosiddetto *unrestricted* che fa riferimento al modello preso per intero, l'altro *restricted* che fa riferimento al modello senza i coefficienti congiuntamente testati. Quando si testa la significatività del modello intero attraverso l'F-test, come in questo caso, il modello *restricted* è detto "*Null model*". Ciò detto si costruiscono le ipotesi del test come segue:

$$\begin{cases} H_0: \beta_{PILprocapite} = \beta_{prod.ind\ o\ prod.lav} = \beta_{conc.gas\ serra} = \beta_{crescita\ popol.} = 0 \\ H_1: \exists! \beta_j \neq 0 \text{ oppure Altrimenti} \end{cases}$$

Costruite le ipotesi, si possono seguire due strade: considerare la statistica test nell'output e mettere in atto un lungo processo per il calcolo del valore critico attraverso la tavola dell'F-test, oppure utilizzare il più immediato p-value del modello calcolato sulla F-test stessa. Nei modelli stimati per la produzione industriale e la produttività del lavoro sono stati ottenuti i seguenti p-value relativi alla significatività del modello:

- **Modello crescita della produzione dell'industria:** p-value pari a 0.0000
- **Modello crescita della produttività del lavoro:** p-value pari a 0.0000

Tali valori se analizzati attraverso la valutazione precedentemente esposta per i coefficienti porta, in entrambi i modelli, alla conclusione che i modelli sono significativi ad un altissimo livello di significatività. Ponendosi infatti nell'intervallo tra 0 e 0.001 (escluso) ad essi viene attribuito un codice di significatività pari a "****", il che porta a concludere che i modelli stimati siano validi per fornire la spiegazione della variabilità della variabile dipendente.

3.4.2 Interpretazione dei coefficienti stimati

Stimati i modelli si possono fare dei commenti sulle relazioni in essi evinte, in modo da comprendere gli specifici legami che li legano alla produzione.

Per il modello che vede la crescita della produzione industriale come variabile dipendente:

Il PIL pro capite ha nel modello un coefficiente positivo, indicando quindi una relazione positiva con la produzione. Pertanto, un aumento del Pil pro capite, riflettendo un

aumento della produzione industriale, impatta positivamente sulla crescita, tale relazione è giustificata da vari fattori: per esempio lo stimolo alla crescita industriale potrebbe provenire da un aumento della domanda aggregata, dovuto a sua volta dall'aumento del reddito disponibile testimoniato dal PIL, oppure lo stimolo potrebbe provenire dalla maggiore stabilità economica di uno stato (che ha quindi PIL pro capite alto), o ancora potrebbe essere spiegata dall'aumento degli investimenti nel settore, spinti dallo stato di sviluppo economico in cui si trova un paese con una crescita positiva del PIL. In sintesi, la relazione positiva tra la crescita del PIL pro capite e la crescita industriale ha molti sottostanti che la giustificano, d'altronde non è un risultato inaspettato dato che anche da un punto di vista teorico una crescita del PIL pro capite generalmente crea un ambiente economico più favorevole, stimolando la crescita non solo industriale ma economica in generale.

Per la produttività del lavoro il coefficiente stimato non disattende le aspettative sulla relazione: il coefficiente positivo dimostra una relazione anch'essa positiva con la crescita industriale. Questa relazione non era inaspettata perché generalmente un aumento della produttività del lavoro, determina la capacità dei lavoratori di produrre di più nello stesso arco temporale. Questo incremento nell'efficienza consente una riduzione dei costi da parte delle imprese, che sottende un aumento della competitività e maggiori profitti. Le maggiori risorse ottenute potrebbero poi essere investite in miglioramenti tecnologici o operativi che includano anche la sostenibilità, impattando positivamente sulla crescita. Pertanto, l'aumento della produttività di un'unità porterà alla crescita industriale un contributo positivo pari a 0.80. Tale contributo dimostra una forte relazione tra la produttività e la crescita industriale proprio perché indica che gran parte della variazione della produttività del lavoro impatta sulla crescita (appunto l'80%). Sugerendo seppur per vie indirette la possibilità, nel caso di investimenti sostenibili, di una crescita sostenibile.

La crescita della popolazione mostra un risultato inaspettato, con un coefficiente di -11.99 circa dimostra che l'evidenza empirica descrive una relazione negativa tra crescita industriale e crescita demografica, al contrario di come precedentemente ipotizzato. Questa forte e negativa relazione può essere spiegata sotto vari aspetti, il primo si evince considerando come un aumento demografico impatta sulle risorse. Con l'aumento demografico

aumenta la domanda aggregata di beni e servizi, mettendo sotto una pressione significativa le risorse naturali e infrastrutturali. Una popolazione costantemente in aumento porta all'intensificazione eccessiva della competitività, così facendo potrebbero aumentare i costi di produzione, rallentando la crescita. Inoltre, l'espansione demografica richiede maggiori investimenti da parte degli stati in infrastrutture e servizi pubblici, riducendo le risorse disponibili per gli investimenti nel settore industriale, riducendo anche in questo caso il tasso di crescita industriale. In ultimo, la riduzione nella crescita industriale può essere anche spiegata dalla crescita demografica sotto l'aspetto del mercato del lavoro, ciò accade nel caso in cui cresce la popolazione, quindi cresce l'offerta di dipendenti, ma se a questa non si aggiunge un aumento della domanda di forza lavoro, si genera una riduzione dei salari portando a un effetto a cascata che riduce la domanda aggregata di beni, portando a una riduzione dei profitti delle imprese, quindi riducendo gli stimoli alla crescita.

La relazione descritta tra la crescita industriale e la concentrazione di gas serra è positiva, inoltre il coefficiente è pari a 4.73 evidenziando una forte relazione. Tale risultato non è inaspettato, coerentemente con quanto affermato nel Capitolo 2, un modello così semplice non prende in considerazione tutti gli effetti indiretti e le opportunità della sostenibilità. Questa relazione evidenzia che un aumento della concentrazione di gas serra, giustificato dall'aumento della produzione industriale, genererebbe uno stimolo alla crescita. Questo accade proprio perché un aumento della produzione implica un maggiore consumo di combustibili fossili per via dell'attività operativa, questi, seppure la tendenza nel loro utilizzo sia in riduzione, rimangono ancora la principale fonte energetica utilizzata nel settore manifatturiero. Pertanto, se la produzione nel settore dovesse aumentare, stimolando la crescita, così farebbero anche le emissioni. Ciò è sintomatico di una ancora eccessiva dipendenza da processi produttivi non sostenibili che sfruttano tecnologie inefficienti, a ciò si lega un aspetto portato in evidenza da Porter, M.E e van der Lind, C. (1995), essi asserivano che l'inquinamento fosse legato a delle inefficienze nel processo produttivo, aggiungendo che in un'economia in cui lo stimolo per la crescita e l'innovazione sostenibile non riesce a partire dalle imprese (perché dipendenti tra le altre cose dal percorso, come evidenziato nei capitoli precedenti) dev'essere l'autorità pubblica con stringenti normative ambientali a rendere più vantaggiosa l'innovazione sostenibile rispetto

che la produzione tradizionale. Ecco, quindi, che si apre un'altra giustificazione per spiegare tale relazione, infatti, nel caso in cui la regolamentazione ambientale nazionale non fosse adeguatamente stringente, questo darebbe adito alle imprese di espandere la produzione senza dover adottare misure significative per la sostenibilità, ciò accade quindi quando la normativa non rappresenta un costo più gravoso di quanto non siano i benefici provenienti dall'aumento della produzione.

Mentre per il modello in cui la variabile dipendente è la crescita della produttività del lavoro:

In questo modello il PIL pro-capite descrive una relazione negativa con la produttività del lavoro, ciò potrebbe sembrare controintuitivo in virtù di quanto asserito in precedenza, tuttavia, ci sono vari motivi di stampo economico e sociale che la giustificano.

In primo luogo, dal punto di vista economico, la relazione potrebbe essere spiegata sfruttando la legge dei rendimenti marginali decrescenti, per cui: la crescita della produttività del lavoro porta a progressivi rendimenti in termini di PIL più piccoli. Tenuto ciò in conto, rigirando la relazione si ottiene una solida giustificazione della relazione suddetta, pertanto in economie già altamente sviluppate, come quella europea, la crescita della produttività del lavoro può non tradursi automaticamente in un aumento del PIL. A questi effetti di carattere economico se ne aggiunge un altro, relativo alla distribuzione di tale produttività; infatti, nel caso in cui i vantaggi generati dalla produttività fossero concentrati nelle mani di un ristretto numero di persone o aziende, allora potrebbero non essere completamente riflessi sul PIL. Infine, tra le motivazioni sociali si annoverano quelle relative all'occupazione, infatti, nel caso in cui la crescita della produttività si manifestasse in settori in contrazione in termini di domanda di forza lavoro, poiché per esempio in questi sono state implementate efficacemente meccanizzazione e automazione, allora il contributo totale al PIL potrebbe diminuire.

La relazione con la produzione dell'industria è positiva così come nel modello precedente, pertanto, tra le due variabili c'è una relazione simmetrica. La relazione si presenta anche con un'intensità simile, infatti, il coefficiente è di circa 0.82 a fronte dello 0.80 del primo modello.

La relazione che si evince dall'analisi in merito alla concentrazione dei gas serra è negativa, come testimonia il coefficiente pari a circa -2.66. Ciò significa che un aumento della concentrazione di gas serra, quindi un peggioramento della situazione ambientale europea, è associato con una riduzione della produttività del lavoro. Tra le ragioni sottostanti principali ci sono quelle legate alla salute dei lavoratori, i quali nel caso di un aumento della concentrazione di gas serra, saranno esposti a una peggiore qualità dell'aria comportando degli effetti negativi sulla salute. Problemi di salute come patologie respiratorie o cardiovascolari riducono la produttività individuale dei dipendenti, aumentando invece le assenze per malattia, che aumentando comportano anche un'instabilità nel processo produttivo che può tradursi in una perdita di efficienza significativa. A ciò si aggiunge che il peggioramento delle condizioni ambientali, porta anche a condizioni di lavoro più difficili, a titolo di esempio: un aumento delle temperature di carattere anormale sicuramente impatterà sulla produttività dei dipendenti. Tali condizioni possono in ultima istanza generare, nei dipendenti sensibili alle questioni ambientali, oggi in crescita nelle imprese, delle condizioni di insofferenza che impattano negativamente sul morale e la motivazione dei lavoratori. Infine, seppure indirettamente, un'impresa che inquina di più dovrà affrontare spese aggiuntive, date dalla necessità di conformazione alle norme vigenti in ambito ambientale, dovrà quindi necessariamente ridurre le spese per la formazione e gli investimenti in nuovi macchinari, condizionando negativamente la produttività. Come si evince le ragioni sottostanti sono molte ma tutte conducono alla stessa conclusione, la quale diverge però da quella ottenuta nel primo modello. Questa differenza nelle valutazioni è di carattere significativo per l'analisi e le conclusioni di essa, coerentemente con quanto precedentemente detto nel secondo capitolo, il primo modello non riesce a tenere adeguatamente in considerazione gli impatti negativi del cambiamento climatico, in quanto, seppure semplificato è assimilabile ai modelli tradizionali criticati, mentre in quest'ultimo la produttività riesce a dare una visione più olistica catturando più efficacemente gli impatti climatici negativi.

Infine, coerentemente con le aspettative la relazione tra produttività del lavoro e crescita della popolazione è positiva e significativa, come testimonia il coefficiente pari a circa 5.62, per cui l'incremento nella crescita della popolazione ha effetti più che proporzionali

sulla produttività del lavoro. Le ragioni sottostanti sono varie ma tra queste sicuramente sono comprese quelle relative la crescita della domanda: una popolazione in crescita porta all'aumento della domanda aggregata stimolando le imprese a investire in processi più efficienti che aumentano la produttività. Nonostante questo, però il valore del p-value eccessivo relativo a questa variabile, pari infatti a 0.21, comporta la non significatività della componente, per cui non c'è l'empirica certezza dell'effetto stimato. Tuttavia, le ragioni economiche che legano positivamente la crescita della popolazione con la produttività sono verificate ampiamente in letteratura. (Pritchett, L.,1996).

3.5 Analisi di Serie Storiche: Analisi Preliminare

Svolta l'analisi regressiva, si è proceduto con l'analisi temporale delle variabili d'interesse. Tale analisi è stata svolta allo scopo di indagare l'andamento temporale delle variabili, così facendo si è verificata la natura della dipendenza della serie storica dalle componenti di tempo ed inoltre è stato possibile effettuare una stima degli andamenti futuri (i due anni successivi all'ultimo incluso).

Lo studio della serie storiche ha seguito gli step determinati nella procedura di Box-Jenkins, utile per la determinazione di un modello che descriva in modo valido la serie storica. La procedura segue queste tre fasi:

- Analisi preliminare
- Analisi empirica
- Diagnostica

La prima fase prevede lo studio grafico della serie allo scopo di individuare trend o componenti stagionali, quindi di dipendenze lineari, verificate prima attraverso i grafici delle *Autocorrelation Function* e poi durante la fase di analisi empirica attraverso il test di Dickey-Fuller.

Una volta impostata la *Time-series* con cadenza annuale e un intervallo di tempo di 23 anni, cioè dal 2000 al 2023, si è proceduto grazie al software Rstudio a rappresentare l'andamento storico delle variabili in un grafico.



Grafico 3.1: Crescita storica della produzione industriale del settore manifatturiero (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)



Grafico 3.2: Crescita storica della produttività del lavoro (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

Il primo (*Grafico 3.1*) mostra l'andamento storico della produzione industriale nel settore manifatturiero europeo, il grafico mostra un andamento abbastanza variabile durante gli anni, non è però presente un trend chiaro, positiva o negativa. Invece, sembrano presenti delle componenti stagionali legate al ciclo economico, tale affermazione è giustificata dai picchi negativi registrati nel 2008 e nel 2019-2020. Il primo causato dalla crisi finanziaria scatenata dal fallimento del mercato immobiliare americano che ha portato al fallimento della banca Lehman Brothers, la quale avendo un'ampia importanza a livello sistemico ha fatto vacillare tutto il sistema bancario portando a una crisi internazionale. Il secondo (*Grafico 3.2*) invece è dovuto alla pandemia COVID-19, che per circa 2 anni ha rallentato il sistema produttivo internazionale ed europeo con ampie conseguenze anche di carattere economico. In entrambi i casi, ha seguito un picco positivo generato dai tentativi di ripresa delle autorità nazionali che in quegli anni hanno provveduto a emettere una grande quantità di investimenti per cercare di risanare il sistema economico. Quasi coincidente è

l'andamento della produttività, in virtù dello stretto legame con la produzione dell'industria; infatti, la crescita storica di questa variabile non presenta chiari segni di trend né positivi né negativi, ciò che si evince è un'alta variabilità dovuta anche agli accadimenti precedentemente citati e più in generale a una probabile componente stagionale. In comune con la crescita storica della produzione ha anche le fasi di recupero, dato che un recupero del settore manifatturiero porta a un incremento della produzione, rispetto al periodo precedente, accompagnato per gli effetti precedentemente descritti da un aumento della produttività. Si rende inoltre utile presentare la crescita storica delle emissioni di gas serra, il grafico in questione da delle informazioni ulteriori in merito alla relazione tra la crescita industriale (sotto il punto di vista della produzione e della produttività) e la sostenibilità.

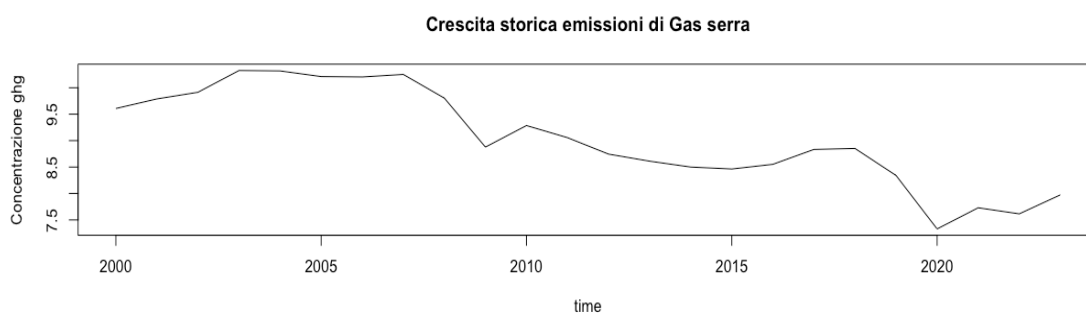


Grafico 3.3: Crescita storica della concentrazione di gas serra nell'atmosfera (Fonte: elaborazioni proprie, Rstudio)

Il Grafico 3.3 è rassicurante dal punto di vista climatico, mostra infatti una chiarissima tendenza negativa delle emissioni, lasciando trasparire indirettamente che le industrie obbligate o meno stanno, almeno dalla crisi finanziaria in poi, sicuramente adottando politiche sostenibili allo scopo di ridurre il rischio climatico a cui l'essere umano è sottoposto. Questo andamento dà inoltre adito all'asserzione contenuta nel precedente paragrafo, per cui il modello stimato sulla produzione del settore manifatturiero non riesce a recepire in modo accurato gli impatti positivi che le pratiche sostenibili possano avere. Infatti, osservando contestualmente la crescita storica della produzione e quella delle emissioni, si nota che nonostante la crescita del settore manifatturiero sia in positivo (anche crescente su alcuni tratti), la concentrazione di gas serra e quindi le emissioni si riduce, appunto al contrario di quanto il coefficiente di regressione stimato lasciasse trasparire.

3.5.1 Autocorrelation Function e Partial Autocorrelation Function

Le *Autocorrelation Function* (ACF) sono strumenti utilizzati per l'analisi più approfondita, ma comunque grafica, della presenza di dipendenze lineari. Una volta rappresentate le ACF si esamina il grafico alla ricerca di ritardi che tocchino le cosiddette Bande di Bartlett, degli intervalli di confidenza utilizzati per valutare la significatività delle dipendenze lineari. Se per un ritardo è registrata un'autocorrelazione che supera le bande, allora quella è statisticamente significativa. L'importanza di verificare prima graficamente e poi empiricamente la presenza di dipendenze lineari è spiegata dalle assunzioni dei modelli autoregressivi, in particolare dalla IV assunzione detta *No perfect collinearity* per cui è previsto che il valore atteso della variabile al tempo t non deve essere determinabile attraverso i suoi ritardi. L'assunzione espressa in formula si presenta in questo modo:

$$\text{Per gli AR: } E(y_t | y_{t-j}) = 0$$

L'assunzione prevede che nel caso di perfetta collinearità il modello non si possa stimare o studiare in alcun modo, mentre invece, nel caso di collinearità non perfetta si può stimare il modello se questa viene eliminata. L'eliminazione dal modello avviene attraverso il processo di differenziazione, lo scopo di tale computazione è rendere adatta allo studio la serie storica, cioè renderla stazionaria. Per stazionarietà si intende la caratteristica della serie di avere un valore atteso della variabile e una covarianza della variabile con i suoi ritardi costante (Stazionarietà debole), oppure di non essere influenzata da alcuno *shock* o *time shift* (Stazionarietà forte). Per le due variabili d'interesse prese in esame il grafico delle ACF si presenta come segue:

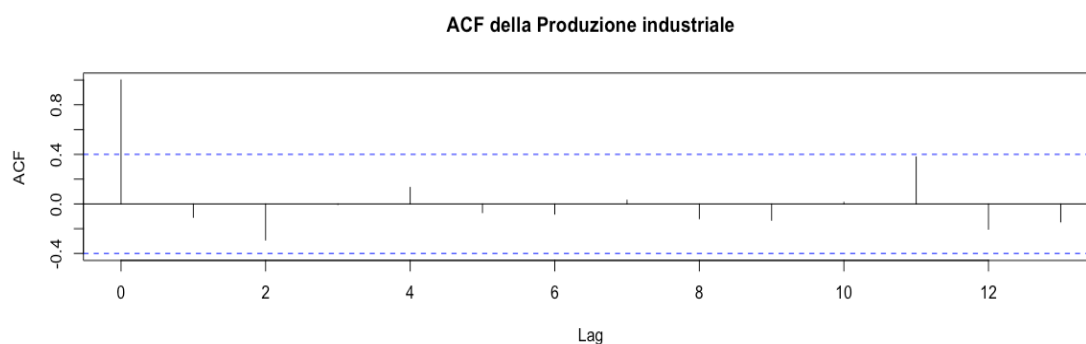


Grafico 3.4: Rappresentazione delle ACF della produzione dell'industria (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

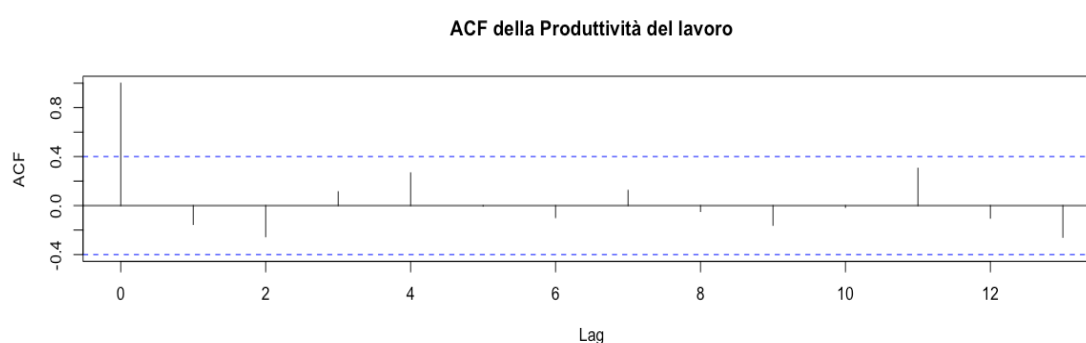


Grafico 3.5: Rappresentazione delle ACF della produttività del lavoro (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

La prima cosa che si nota dal *Grafico 3.4* delle ACF della produzione è la non presenza di un effettivo trend, a conferma di quanto detto precedentemente, ciò risulta evidente dall'andamento delle autocorrelazioni, queste non prendendo valori solo positivi o solo negativi non presentano le caratteristiche tipiche dei trend strutturali. Sono evidenti però, ad ulteriore conferma di quanto detto in precedenza, alcune componenti stagionali. In generale non sono presenti fortissime dipendenze lineari, salvo che al ritardo 11 in cui sembrerebbe esserci una ACF significativa, dato successivamente testato durante l'analisi empirica. Per quanto riguarda invece la produttività del lavoro (*Grafico 3.5*), anch'essa come la produzione presenta segni di componenti stagionali, inoltre non sono presenti fortissime significatività, infine, le ACF che più si avvicinano alla significatività si trovano ai ritardi 2,4 e 11, rimanendo comunque lontane dalla frontiera determinata dalle Bande di Bartlett.

Esaminata la presenza di dipendenze lineari si passa a considerare, attraverso le Partial Autocorrelation Function (PACF), la possibile presenza di un ritardo ottimale. Come le Autocorrelation Function queste misurano la correlazione tra una variabile e i suoi ritardi, ma a differenza delle stesse le PACF non considerano i ritardi intermedi cioè: volendo calcolare la correlazione della variabile y_t rispetto al suo ritardo y_{t-2} , le PACF non terranno in considerazione il ritardo y_{t-1} nel calcolo. Così come per le ACF però la significatività si riscontra se per un ritardo la PACF supera le Bande Di Bartlett, se esistono più ritardi per cui questa condizione è soddisfatta, si considera come ottimale l'ultimo significativo. Le PACF per le variabili d'interesse dell'analisi avevano la seguente composizione:

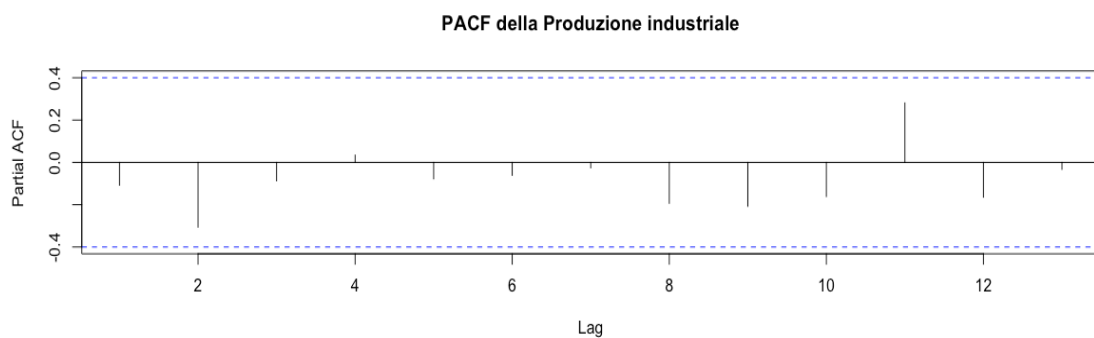


Grafico 3.6: Rappresentazione delle PACF della produzione dell'industria (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

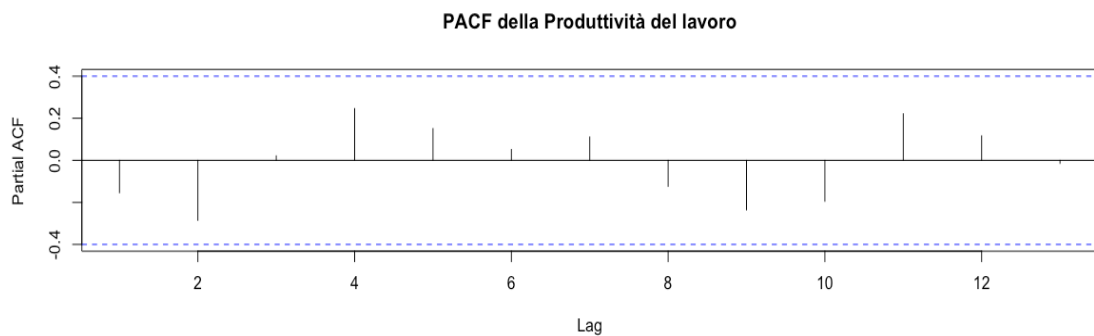


Grafico 3.7: Rappresentazione delle PACF della produttività del lavoro (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

Dal primo (Grafico 3.6), quello relativo alle PACF della produzione industriale, non si può evincere un ritardo ottimale significativo (che supera le bande di significatività), nonostante ciò, si può identificare nell'undicesimo lag (ovvero l'undicesimo ritardo) un ritardo ottimale ipotetico dato che questo ritardo ha la PACF più vicina alle bande di significatività. Inoltre, anche per quanto riguarda il secondo modello (Grafico 3.7) non sono presenti ritardi ottimali significativi, ma se ne può identificare uno ipotetico nel

decimo *lag*. Nel prossimo paragrafo sono presentati i risultati dell'analisi empirica svolta allo scopo di verificare la presenza di dipendenze lineari e ritardi ottimali.

3.6 Analisi empirica

Svolta l'analisi preliminare si è proceduto a verificare quanto evidenziato durante l'analisi preliminare in merito alle dipendenze lineari e ai ritardi ottimali. Per l'analisi delle dipendenze lineari è stato utilizzato il test Dickey-Fuller, in particolare dato che il test è stato condotto su un ordine di ritardi maggiore di 1, il test Dickey-Fuller è stato condotto nella variante "*Augmented*". Le ipotesi di questo test prevedono la seguente composizione:

$$\begin{cases} H_0: \text{modello non stazionario} \\ H_1: \text{modello stazionario} \end{cases}$$

I risultati calcolati con un ordine di ritardi pari a 3, il primo considerato non troppo piccolo per l'analisi da parte del sistema, sono i seguenti:

```
data: prod_ind  
Dickey-Fuller = -2.2382, Lag order= 3, p-value = 0.4816
```

```
data: prod_lav  
Dickey-Fuller = -2.8104, Lag order= 3, p-value = 0.2637
```

Come risulta evidente entrambi I modelli sono non stazionari, confermando quanto evinto dall'analisi grafica, cioè la presenza di componenti stagionali nella serie storica. Per tale motivo, sono state calcolate le differenze prima, così da annullare gli effetti delle componenti stagionali ed utilizzare nei passi successivi dell'analisi una variabile stazionaria. Le crescite storiche dei modelli dopo la differenziazione si presentano come rappresentato nei grafici.



Grafico 3.8: Crescita storica della Produzione industriale differenziata (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)



Grafico 3.9: Crescita storica della Produttività del lavoro differenziata (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

Dai grafici (*Grafico 3.8 e 3.9*) si nota come la differenziazione abbia ridotto di molto la variabilità delle serie storiche, rimangono però i picchi generati dagli eventi mondiali, cioè la crisi finanziaria e la pandemia COVID-19.

Dopo aver testato la presenza di dipendenze lineari e calcolato le differenze prime, si utilizzano le suddette per il calcolo di due modelli autoregressivi (AR) attraverso il metodo della massima verosimiglianza, allo scopo di utilizzare tali modelli per identificare un ritardo ottimale. Per il calcolo dei ritardi ottimali è stato utilizzato il criterio d'informazione Akaike (AIC), ottenendo: per il modello che prende come variabile dipendente la produzione industriale, che il ritardo ottimale è l'undicesimo, confermando quanto evinto dall'analisi grafica delle PACF. Anche nel secondo modello, con la produttività del lavoro come variabile d'interesse, l'AIC ha confermato quanto osservato durante l'analisi grafica, identificando il decimo *lag* come ritardo ottimale.

Su tali ritardi ottimali sono stati stimati rispettivamente due modelli autoregressivi, di seguito l'output Rstudio che mostra la significatività dei ritardi in tali modelli.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
ar1	-0.6503	0.2161	-3.0098	0.0026	**
ar2	-0.6759	0.2492	-2.7123	0.0067	**
ar3	-0.5130	0.2867	-1.7894	0.0735	.
ar4	-0.3983	0.2811	-1.4174	0.1564	
ar5	-0.4041	0.2658	-1.5200	0.1285	
ar6	-0.4337	0.2505	-1.7313	0.0834	.
ar7	-0.5138	0.2559	-2.0077	0.0447	*
ar8	-0.5531	0.2840	-1.9472	0.0515	.
ar9	-0.4196	0.3118	-1.3457	0.1784	
ar10	-0.3611	0.2873	-1.2566	0.2089	
ar11	0.4683	0.2369	1.9766	0.0480	*
intercept	-0.0059	0.1099	-0.0536	0.9572	

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Quello sopra è il modello autoregressivo stimato sulla serie storica differenziata della produzione industriale, risulta evidente dal grafico la necessità di prendere tutti e 11 i ritardi considerati per la significatività in esso riscontrata. Per questo motivo sarà denominato AR(11).

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
ar1	-1.0674	0.1335	-7.9969	0.0000	***
ar2	-1.0821	0.2364	-4.5776	0.0000	***
ar3	-0.8979	0.3328	-2.6982	0.0070	**
ar4	-0.5490	0.4008	-1.3697	0.1708	
ar5	-0.1724	0.4498	-0.3834	0.7014	
ar6	-0.2321	0.4647	-0.4994	0.6175	
ar7	-0.3394	0.4491	-0.7558	0.4498	
ar8	-0.5031	0.3895	-1.2917	0.1964	
ar9	-0.6388	0.2784	-2.2944	0.0218	*
ar10	-0.7554	0.1390	-5.4353	0.0000	***
intercept	-0.1708	0.0686	-2.4912	0.0127	*

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Quello sopra rappresentato è invece il modello autoregressivo, ottenuto tramite il software di calcolo, relativo al modello che prende come variabile dipendente la produttività del lavoro. Anche in questo caso, data la presenza di una significatività nel decimo ritardo, si considera un modello che li comprende fino a tal ultimo. Questo modello è invece denominato AR(10).

Si può notare che rispetto al modello AR(11), questo, nel suo ultimo ritardo dimostra una significatività più alta, nello specifico fra il 99.9% escluso e il 100% , mentre il modello della produzione industriale ha una significatività è di circa il 95%.

Stimati i modelli, prima di poter effettuare la previsione dell'andamento futuro (*forecasting*) delle variabili d'interesse è stato necessario verificare la validità dei modelli. In letteratura perché un modello sia valido ed utilizzabile per il forecasting, non deve presentare dipendenze lineari tra i suoi residui, dette correlazioni seriali. Per verificare tale condizione si è proceduto in primo luogo a un'analisi grafica delle funzioni di autocorrelazione dei residui (ACF) e in secondo luogo alla verifica di quanto evinto dal punto di vista diagnostico. Quest'ultima verifica è stata condotta attraverso un test denominato Ljung-Box.

Di seguito i grafici ottenuti grazie a Rstudio delle ACF dei residui dei due modelli.

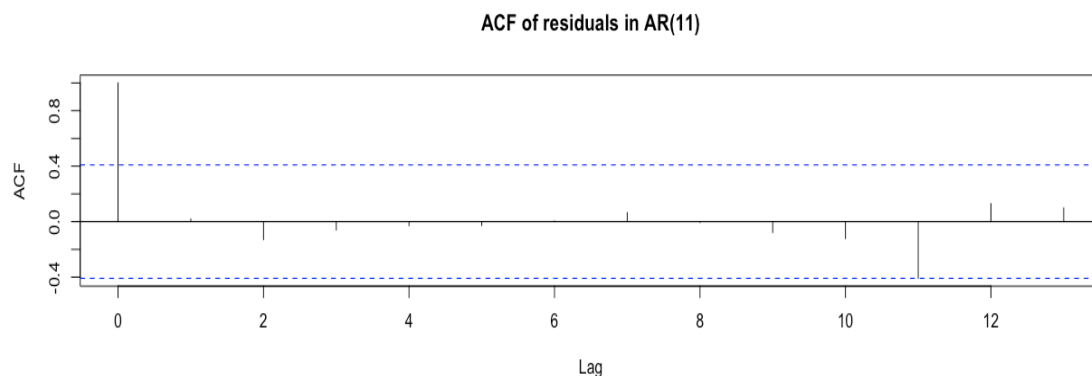


Grafico 3.10: Rappresentazioni delle ACF dei residui del modello AR(11) relativo alla produzione industriale. (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

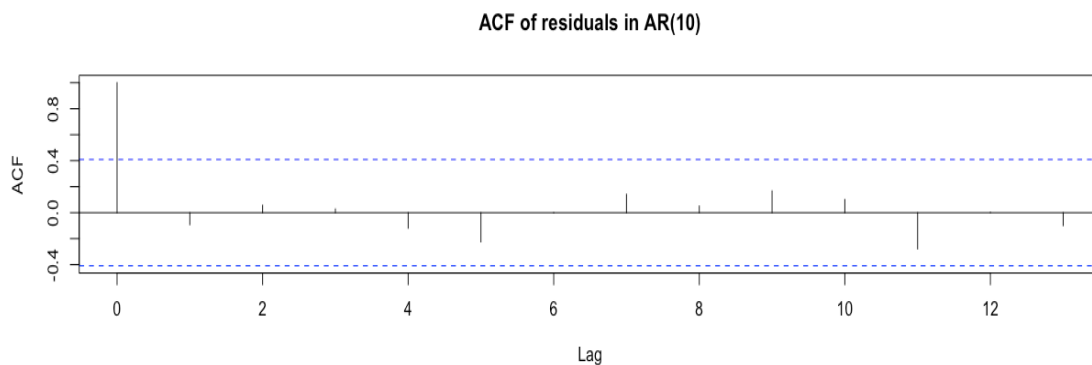


Grafico 3.11: Rappresentazioni delle ACF dei residui del modello AR(10) relativo alla produttività del lavoro. (Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

L'analisi di queste rappresentazioni è svolta così come è stata svolta l'analisi delle ACF sulla serie storica, cioè considerando le Bande di Bartlett, le quali rappresentano un intervallo di confidenza al 95%. Le bande fungono da frontiera per la significatività delle correlazioni seriali, nel caso in cui la funzione di autocorrelazione di un residuo superasse la frontiera posta dalle bande, allora per quello si identifica una correlazione seriale significativa. Se tale condizione si verifica il modello non è valido e pertanto non può essere svolto il forecasting.

Nello specifico, il primo modello AR(11) (*Grafico 3.10*), non sembra presentare gravi autocorrelazioni tra i residui se non per l'undicesimo ritardo, che si avvicina di molto alle bande di Bartlett. La verifica della significatività empirica successivamente svolta, dimostrerà se tale autocorrelazione è significativa rendendo non valido il modello.

Per quanto riguarda il secondo modello AR(10) (*Grafico 3.11*) invece, escluso il $lag=0$ che rappresenta il periodo d'osservazione, quindi non ritardato, questo non presenta alcun segno di non validità, tutte le autocorrelazioni infatti sono molto distanti dalle frontiere rappresentate dalle bande di Bartlett.

3.7 Diagnostica

Svolta la preliminare analisi grafica sulle funzioni di autocorrelazione dei residui, si è proceduto a verificare quanto evinto da tale analisi attraverso un test diagnostico. Il test sfruttato per la verifica è chiamato Ljung-Box e le ipotesi sottostanti al test sono:

$$\begin{cases} H_0: \text{non ci sono correlazioni seriali} \\ H_1: \text{altrimenti} \end{cases}$$

Sfruttando il software Rstudio sono stati ottenuti i seguenti risultati

```
Box-Ljung test
```

```
data: res.mind  
X-squared = 9.6355, df = 11, p-value = 0.5634
```


Box-Ljung test

```
data: res.mlav  
X-squared = 4.7956, df = 10, p-value = 0.9044
```

Il primo output (`res.mind`) fa riferimento al modello AR(11), in questo il p-value pari circa a 0.56 è significativamente maggiore a 0.05, ossia il livello di significatività considerato (95%). Pertanto, è accettata l'ipotesi nulla di non presenza di correlazioni seriali, per cui questo modello è valido e può essere utilizzato per la previsione degli andamenti.

Anche il secondo modello (`res.mlav`) che fa riferimento al modello AR(10) ha un p-value significativamente maggiore del livello di significatività considerato, pertanto anche per questo modello è accettata l'ipotesi nulla, pertanto il modello è valido e può essere utilizzato per la previsione degli andamenti.

3.8 Forecasting

Appurato che i modelli fossero validi, si è poi proceduto alla stima dei valori futuri attraverso il *forecasting* per i due periodi successivi ovvero gli anni 2024 e 2025. Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti, insieme con la misura dell'accuratezza della stima e la rappresentazione dei valori stimati congiuntamente alla crescita storica descritta nella *time-series*.

Le stime relative al modello AR(11) sono pari a:

```
$pred  
Time Series:  
Start = 24  
End = 25  
Frequency = 1  
[1] 1.2110 3.7228
```

Con (`$pred`) si intende il valore previsto per h periodi in avanti, in formula esso è solitamente rappresentato come: $y_{T+h|T}$. I valori risultanti per l'anno 2024 e per il 2025 sono:

$$y_{2024|2023} = 1.2110$$

$$y_{2025|2023} = 3.7228$$

L'output relativo all'accuratezza include un importante indice l'RMSFE (indicato nell'output come RMSE), indicatore molto importante per valutare l'efficienza dei modelli autoregressivi. Di seguito l'output ottenuto:

	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
Training set	-0.1083	2.2759	1.4317	-17.9747	80.1387	0.2007	0.0193

Infine, si procede a presentare l'andamento storico della produzione industriale, insieme con i dati relativi alla previsione:

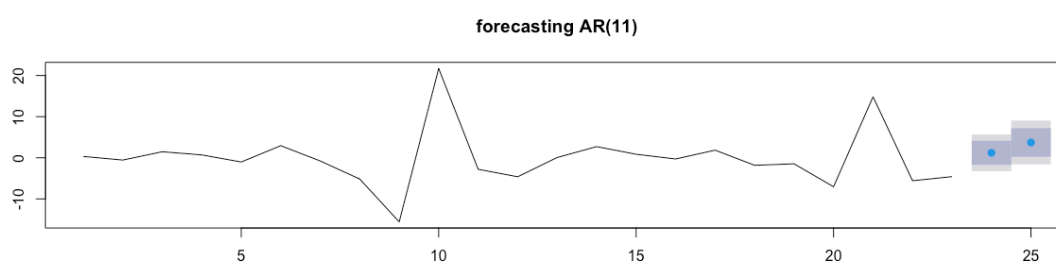


Grafico 3.12: Rappresentazione grafica della previsione per gli anni 2024 e 2025 del modello AR(11)
(Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

Il Grafico 3.12 mostra che sia per il 2024 che per il 2025 la produzione industriale crescerà, nonostante questo però, la variabilità è elevata (dimostrato dalla larghezza delle bande grigie). Una giustificazione per questo andamento è il crescente numero di investimenti da parte delle imprese del settore in innovazioni tecnologiche del processo produttivo, che muovono la filiera produttiva europea verso le cosiddette *Smart Factory*, precedentemente citate. Tale ipotesi risulta non totalmente priva di fondamento se si considerano le politiche monetarie ad oggi esistenti che incentivano tali investimenti, insieme con le evidenze riportate nel documento della Commissione Europea “The 2023 EU industrial R&D investment scoreboard” (Nindl, E. et. al.,2023), nel quale è evidenziato la tendenza positiva delle imprese europee in investimenti innovativi negli ultimi anni. Gli investimenti posti in essere dalle imprese hanno un impatto positivo sulla produzione industriale, poiché permettono a quest’ultime di produrre in modo più efficiente; infatti, con l’investimento per esempio in nuovi macchinari più innovativi si possono migliorare i processi industriali rendendoli più produttivi, aumentando di contestualmente i profitti. Infine, se gli investimenti sono legati come ipotizzato alle Smart Factory, la crescita della produzione industriale avviene anche sotto il punto di vista ambientale.

Le stime relative al modello AR(10) sono invece pari a:

```
$pred
Time Series:
Start = 24
End = 25
Frequency = 1
[1] -0.7297  3.9700
```

Anche qui con (`$pred`) si intende il valore previsto per h periodi in avanti, in formula esso è solitamente rappresentato come: $y_{T+h|T}$. I valori risultanti per l'anno 2024 e per il 2025 sono:

$$y_{2024|2023} = -0.7297$$

$$y_{2025|2023} = 3.9700$$

Di seguito l'output ottenuto in merito all'accuratezza del modello:

	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
Training set	-0.1136	1.7757	1.2516	36.8940	61.7166	0.1967	-0.0926

Infine, si procede anche per questo modello a presentare l'andamento storico della produzione industriale, insieme con i dati relativi alla previsione:

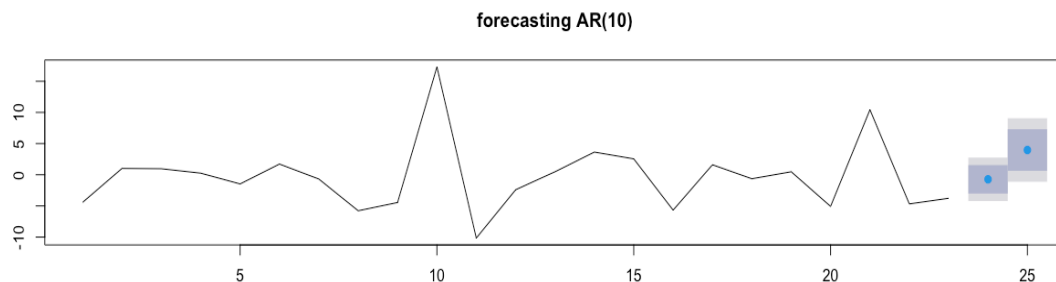


Grafico 3.12: Rappresentazione grafica della previsione per gli anni 2024 e 2025 del modello AR(10)
(Fonte: proprie elaborazioni, Rstudio)

L'andamento stimato nel *Grafico 3.12* prevede anche per la produttività del lavoro una tendenza di crescita negli anni stimati, questo risultato è coerente con quello ottenuto per la produzione industriale per la già più volte citata relazione con quest'ultima variabile. La stima ha anche per questo modello un'alta variabilità sintomo della non alta efficienza del modello, tale variabilità è testimoniata dalle bande nel grafico attorno al punto di stima. La crescita della produttività nel settore manifatturiero potrebbe essere dovuta,

oltre che da un aumento degli investimenti , anche dal progressivo recupero che il settore sta affrontando in seguito agli shock subiti negli anni precedenti, nello specifico la pandemia COVID-19 del periodo 2019-2021 e il più recente conflitto ucraino-russo in atto dal 2022. Dei due lo shock che maggiormente ha stimolato una crescita sostenibile della produzione è il conflitto ucraino-russo, questo, creando instabilità sulla catena di fornitura energetica (contestualmente con un aumento dei costi energetici) ha spinto le imprese a investire nella produzione allo scopo di ridurre la dipendenza di quest'ultima dai combustibili fossili migliorando al contempo l'efficienza energetica, in questo modo con sistemi produttivi più efficienti dal punto di vista energetico si ha un impatto positivo sulla produttività.

4. Conclusioni

L'analisi finora svolta aveva lo scopo di indagare la natura e la presenza, o meno, di una relazione significativa tra la crescita e l'impatto ambientale del settore manifatturiero europeo. Ad oggi, il rischio climatico riveste un ruolo determinante nelle decisioni politiche e le strategie aziendali, in quanto al centro delle preoccupazioni globali. Indagare empiricamente su tale relazione è utile per meglio comprendere come le strategie implementate dalle industrie impattino sull'ecosistema, in tal modo si possono dare ragioni statistiche alla necessità crescente di strategie ambientali, oltre che dare un giudizio empirico sull'efficacia delle normative ambientali ad oggi vigenti.

Dopo aver discusso ampiamente degli ostacoli e delle opportunità di una crescita sostenibile, è stata svolta l'analisi empirica che ha portato alla stima di due modelli di regressione multipla e due modelli autoregressivi. L'indagine è stata svolta nell'ambito del settore manifatturiero europeo, in virtù della sua importanza dal punto di vista economico e della capacità di influenzare indirettamente gli altri settori (come quello energetico). I risultati data la presenza di due variabili d'interesse, sono duplici, caratteristica che è però la chiave per la loro interpretazione.

Il primo modello, basato sulla produzione industriale, ha concluso che tra questa e l'inquinamento incorre una relazione positiva, per cui all'espansione del settore manifatturiero è correato un peggioramento delle condizioni ambientali europee. Si può quindi concludere in primo luogo che ad oggi la crescita del settore manifatturiero europeo è ancora ampiamente legata a tecnologie inquinanti e in secondo luogo che le normative ambientali ad oggi vigenti non riescono né a limitare la crescita non sostenibile in modo adatto né a creare sufficienti opportunità ed incentivi per sostenere le pratiche sostenibili. Il secondo modello invece ha concluso che tra la produttività del lavoro e l'inquinamento incorre una relazione negativa, per cui l'aumento dell'inquinamento influenzando in vari modi la filiera produttiva riduce la produttività del lavoro. Come dimostrato durante l'analisi, tra la produttività del lavoro e la produzione dell'industria c'è una sottostante relazione positiva, se aumenta la produttività, la produzione ne risentirà positivamente, di conseguenza il settore manifatturiero crescerà. La presenza di questa duplicità contrapposta di conclusioni, in comunione con la sottostante relazione tra le due variabili, dimostra quanto asserito nel Capitolo 2, ossia che modelli semplicistici come quelli proposti

non riescono a cogliere bene l'effettiva relazione tra crescita e ambiente se non sono considerati gli effetti indiretti che l'inquinamento porta. Attraverso la produttività del lavoro si possono però meglio scorgere tali aspetti. Difatti, se si considera l'andamento storico della concentrazione di gas serra, si può notare che nonostante questa stia cavalcando una trend negativo, il settore manifatturiero continua a crescere (come testimoniato dall'andamento delle variabili d'interesse). Ciò consegue che dal punto di vista dei modelli regressivi, tenendo in considerazione tali andamenti, solo la produttività del lavoro manifestando una relazione negativa riuscirebbe a cogliere pienamente l'attuale relazione tra crescita e ambiente. Nonostante sia in tal modo confermata l'inaccuratezza della relazione stimata dal modello della produzione, questo rimane utile come monito per le autorità nazionali e le imprese stesse, poiché evidenzia l'insufficienza delle regolamentazioni ambientali e delle pratiche sostenibili ad oggi in atto.

Pertanto, è possibile concludere che, nonostante la crescita del settore manifatturiero europeo sia ancora significativamente legata a pratiche industriali inquinanti, ci sono le evidenze di una progressiva inversione di tale relazione, sottolineando che l'impegno posto dalle autorità nazionali e dagli imprenditori, seppur tutt'ora non sufficiente a ridurre significativamente il rischio climatico, sta dando risultati promettenti. Testimoniando in ultimo che i benefici di una transizione ecologica non riguardano solo l'ambiente, ma anche la comunità e l'azienda stessa.

Bibliografia e Sitografia

1. Hibbard, K.A., Crutzen, P.J., Lambin, E.F., Liverman, D.M., Mantua N.J., McNeill, J.R., Messerli, B., and Steffen, W. (2007). “Decadal-scale interactions of humans and the environment”, *Sustainability or Collapse? An Integrated History and Future of People on Earth*, MIT Press.
2. Head MJ, Steffen W, Fagerlind D, Waters CN, Poirier C, Syvitski J, Zalasiewicz JA, Barnosky AD, Cearreta A, Jeandel C, Leinfelder R, McNeill J, Rose NL, Summerhayes C, Waples M, Zinke J. (2021). “The Great Acceleration is real and provides a quantitative basis for the proposed Anthropocene Series/Epoch”, *Journal of International Geoscience*. IUGS.
3. IPCC. (2013). “Climate change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, Cambridge University Press, Cambridge.
4. Fourier, Joseph. (1824). "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires." *Annales de Chimie et de Physique* 27.
5. IPBES. (2019). “Global assessment report on biodiversity and ecosystem services”. *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES
6. Almond, R.E.A., Grooten, M., Petersen, T. (2022). “WWF- Living Planet Report-2022”, WWF.
7. Agenzia per la Coesione Territoriale. "Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile." <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>. Consultato il 13/04/2024
8. Council of the European Union. "Paris Agreement." <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>. Consultato il 13/04/2024
9. European Commission. "Industrial Emissions Directive." https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-emissions-directive_en?prefLang=it&etrans=it. Consultato il: 14/04/2024
10. European Commission. "Causes of Climate Change." https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it. Consultato il: 14/04/2024
11. Direttiva 2010/75/UE. (2010). “DIRETTIVA 2010/75/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO relativa alle emissioni industriali (prevenzione e

- riduzione integrate dell'inquinamento)". *Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea*, Parlamento Europeo.
12. European Environment Agency. (2019). "The European environment —state and outlook 2020 Knowledge for transition to a sustainable Europe". *EEA*
 13. EEA. (2019). "Industrial waste water treatment — pressures on Europe's environment", *EEA Report No 23/2018*, European Environment Agency
 14. Jones, D. T., Roos, D., and Womack, J. P., (1990). "Machine That Changed the World," Simon and Schuster.
 15. Herrmann, C., Schmidt, C., Kurle, D. *et al.* (2014). "Sustainability in manufacturing and factories of the future". *International Journal of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*
 16. Despeisse, M., Ball, P. D., Evans, S., and Levers, A., (2012). "Industrial Ecology at Factory Level-A Conceptual Model," *Journal of Cleaner Production*.
 17. Ayres, R. U. and Simonis, U. E. (1994). "Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development," *United Nations University Press*.
 18. Chen, J. and Poon, C.-S. (2009). "Photocatalytic Construction and Building Materials: From Fundamentals to Applications," *Building and Environment*, NREL.
 19. Ashton, K. (2009), "That 'Internet of Things' Thing," *RFiD Journal*.
 20. Ekins, P. & Zenghilis D. (2021). "The cost and benefits of environmental sustainability", *Sustainability Science vol. 16*, Springer.
 21. Nordhaus, W. D. (2018), "Climate change: the ultimate challenge for economics", *Nobel Lecture in Economic Sciences*, Nobel Prize Outreach.
 22. IAMC. (2023). "IAMC wiki – The common Integrated Assessment Model (IAM) documentation". https://www.iamcdocumentation.eu/index.php/IAMC_wiki. Consultato: 13/05/24
 23. Stern, N. and Stiglitz, J. E. (2023). "Climate change and growth". *Industrial and Corporate Change*. Oxford University press.
 24. Adnkronos. (2024) "Clima, 38mila miliardi di danni ogni anno fino al 2050: lo studio", *Adnkronos*.
 25. Shiller, R. J. (2015), *Irrational Exuberance: Revised and Expanded Third Edition*. Princeton University Press

26. Ranger, N., Mahul, O. & Monasterolo, I. (2021), “Managing the financial risks of climate change and pandemics: What we know (and don’t know)”. One Earth.
27. Domar, E. D., (1946). “Capital Expansion, Rate of Growth, and Employment.” *Econometrica* 14, no. 2.
28. Ellen MacArthur Foundation, (2019). “Completing the picture: How the circular economy tackles climate change”, Material Economics.
29. Stiglitz, J. E. & Greenwald, B.C. (2014). “Creating A Learning Society: A New Approach to Growth”, Development, and Social Progress. Columbia University Press: New York, NY.
30. Way, R., Ives, M. C & Farmer, J. D. (2022), “Empirically grounded technology forecasts and the energy transition”. Joule.
31. Commissione Europea. (2024). "Meccanismo di adeguamento del carbonio alla frontiera (CBAM)." https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en?prefLang=it#:~:text=Il%20meccanismo%20di%20adeguamento%20del,pi%C3%B9%20pulita%20nei%20Paesi%20terzi. Consultato il: 18/05/2024
32. Stiglitz, J. E. (1994), “Endogenous growth and cycles”, *Working Paper No.4286*. NBER.
33. Oxford References, “Path-dependent”. <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803100310271>. Consultato il: 21/05/2024
34. Fink, L. (2021), “Larry Fink’s 2021 letter to CEOs”. BlackRock, <https://www.blackrock.com/us/individual/2021-larry-fink-ceo-letter>. Consultato il 21/05/2024
35. European Union Law. "Member States". <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/glossary/member-states.html#:~:text=A1%20momento%20sono%20pre-senti%2027,%2C%20Slovacchia%2C%20Finlandia%20e%20Svezia>. Consultato il: 22/05/2024
36. Porter, M. E., & Claas van der Linde. (1995). "Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship." *Journal of Economic Perspectives*. American Economic Association.

37. Pritchett, L. (1996), "Population Growth, Factor Accumulation and Productivity", *Poverty and Human Resources Division- Policy Research Department*, World Bank.
38. Nindl, E., Confraria, H. & Calza, E. (2023). "The 2023 EU industrial R&D investment scoreboard". *Publications Office of the European Union*. European Commission, Joint Research Centre.