



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Fattori di emissione atmosferica di CO₂ e altri gas a effetto serra nel settore elettrico

RA P P O R T I





ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Fattori di emissione atmosferica di CO₂ e altri gas a effetto serra nel settore elettrico

Informazioni legali

L'istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma

www.isprambiente.gov.it

© ISPRA, Rapporti 257/17

ISBN ISBN 978-88-448-0812-9

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: Franco Iozzoli e Paolo Orlandi

ISPRA – Area Comunicazione

Coordinamento editoriale:

Daria Mazzella

ISPRA – Area Comunicazione

Il testo è disponibile sul sito web ISPRA all'indirizzo: <http://www.isprambiente.gov.it>

Autori

Antonio Caputo

Contatti: Antonio Caputo

Tel. 0650072540

Fax 0650072657

e-mail antonio.caputo@isprambiente.it

ISPRA- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale

Monitoraggio e prevenzione degli impatti sull'atmosfera

Via V. Brancati, 48

00144 Roma

www.isprambiente.gov.it

“When the Paris Exhibition closes, electric light will close with it and no more be heard of.”

Sir Erasmus Wilson in occasione dell'Esposizione di Parigi del 1878.

INDICE

RIASSUNTO / ABSTRACT	6
INTRODUZIONE	7
1 PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA	8
1.1 Produzione termoelettrica e rinnovabile	8
1.1.1 <i>Potenza installata e produzione elettrica</i>	15
2 FATTORI DI EMISSIONE DEI COMBUSTIBILI	20
2.1 Emissioni di CO ₂ dal settore termoelettrico	21
2.1.1 <i>Fattori di emissione di CO₂ per la produzione e il consumo di energia elettrica</i>	24
2.1.2 <i>Emissione di altri gas a effetto serra del settore elettrico</i>	28
3 ANALISI DELLA DECOMPOSIZIONE	30
3.1 Structural Decomposition Analysis (SDA)	30
3.2 Index Decomposition Analysis (IDA)	32
3.3 Analisi della decomposizione applicata alle emissioni atmosferiche	32
3.3.1 <i>Risultati dell'analisi della decomposizione</i>	33
3.4 Energia elettrica e PIL	36
3.5 Analisi della decomposizione delle emissioni atmosferiche da consumi elettrici	38
CONCLUSIONI	44
BIBLIOGRAFIA	45

RIASSUNTO / ABSTRACT

In questo rapporto è descritto l'andamento della produzione elettrica con particolare attenzione alle diverse fonti. Sono stati elaborati i fattori di emissione atmosferica di anidride carbonica e altri gas a effetto serra per la generazione e i consumi di energia elettrica. I fattori di emissione per il settore elettrico sono indispensabili per la programmazione e il monitoraggio di misure di riduzione delle emissioni di gas serra, in relazione alle strategie di sviluppo del settore a livello nazionale e alle misure di risparmio energetico che è possibile adottare anche a livello di usi finali. Le emissioni di CO₂ del settore elettrico sono state analizzate attraverso la decomposizione dei fattori determinanti. Sono state applicate due metodologie di decomposizione (*Structural decomposition analysis* e *Index Decomposition Analysis*) ai dati aggregati del settore.

La produzione elettrica lorda da fonti rinnovabili è passata da 34,9 TWh nel 1990 a 108,9 TWh nel 2015 con un incremento particolarmente sostenuto dal 2008 fino al 2014 e una riduzione negli ultimi anni. L'energia fotovoltaica mostra l'incremento più significativo: da 0,2 TWh a 22,9 TWh dal 2008 al 2015. Le emissioni di CO₂ da produzione elettrica sono diminuite da 126,2 Mt nel 1990 a 93,6 Mt nel 2015, mentre la produzione lorda di energia elettrica è passata da 216,6 TWh a 283 TWh nello stesso periodo; pertanto i fattori di emissione di CO₂ mostrano una rapida diminuzione nel periodo 1990-2015. L'analisi della decomposizione mostra che storicamente l'aumento dell'efficienza tecnologica nel settore termoelettrico e il conseguente impiego di combustibili a minore contenuto di carbonio hanno avuto un ruolo determinante nella diminuzione delle emissioni di CO₂ ma a partire dal 2007 l'apporto delle fonti rinnovabili assume una dimensione rilevante, con un contributo alla riduzione delle emissioni atmosferiche superiore a quanto registrato per le altre componenti. Per i consumi elettrici l'analisi della decomposizione mostra che l'efficienza contribuisce alla riduzione delle emissioni atmosferiche solo nel settore industriale che rivela una struttura piuttosto eterogenea per i diversi comparti, mentre nel settore terziario la diminuzione dei fattori di emissione per la produzione elettrica è compensata dall'incremento dei consumi elettrici. Nel settore domestico si ha un forte disaccoppiamento tra consumi elettrici e corrispondenti emissioni atmosferiche.

The report shows electricity generation trends paying attention to the different fuel sources. CO₂ and other GHGs emission factors for electricity generation and consumption have been calculated. Emission factors for power sector are useful tools for planning and monitoring projects that aim GHG emissions reductions either as concerns strategies of electricity production at national level or energy saving measures at user level. CO₂ emissions from power sector have been analyzed through decomposition analysis. Two techniques of decomposition analysis have been considered (*Structural decomposition analysis* and *Index Decomposition Analysis*) and the index approach has been applied to structural decomposition analysis.

Electricity generation from renewable sources has increased from 34.9 TWh in 1990 to 108,9 TWh in 2015 with a steeper increase between 2008 and 2014 and a sensible reduction in the last years. Photovoltaic energy shows the highest increase rate: from 0.2 TWh in 2008 to 22.9 TWh in 2015. CO₂ emissions by electricity generation has decreased from 126.2 Mt in 1990 to 93.6 Mt in 2015, while gross electricity generation has increased in the same period from 216.9 TWh to 283 TWh; so the emission factors for electricity generation has decreased sharply in the period 1990-2015. Decomposition analysis shows that historical improvement of technological efficiency in power sector and consequential fuel switch played dominant role in decreasing CO₂ emissions, but from 2007 the renewable sources grow significantly and their role in emissions reduction became higher than other factors. As for electricity consumption the decomposition analysis shows that efficiency increase contributes to emissions reduction only in industry sector which is characterized by rather heterogeneous subsectors, while in the tertiary sector the decrease of emission factors is offset by increase of electricity consumption. A strong decoupling between emissions and electricity consumption is evident in the household sector.

INTRODUZIONE

Molte attività umane hanno come conseguenza l'emissione in atmosfera di sostanze inquinanti. Tra le attività che determinano maggiori emissioni vi sono i trasporti, la produzione di energia elettrica da combustibili fossili, i processi industriali, la distribuzione dei carburanti e dei combustibili, il riscaldamento degli edifici, le attività agricole e l'allevamento, l'utilizzo di vernici e solventi. Al cuore di quasi tutti i processi con cui gli inquinanti vengono immessi in atmosfera vi è l'energia: la produzione, la trasformazione e l'utilizzo di energia.

La richiesta di energia è strettamente legata alle esigenze di un sistema economico basato sul paradigma del consumo. In tale contesto un importante fattore, comune a tutti i Paesi sviluppati ed emergenti, è la costante crescita del consumo di energia elettrica. In Italia la maggior parte dell'energia elettrica è stata prodotta fino a qualche anno fa da combustibili fossili. Nell'ultimo decennio, al fine di ridurre la dipendenza dalle fonti fossili e a causa del crescente aumento delle concentrazioni di inquinanti atmosferici, sono diventate prioritarie le iniziative di promozione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Il crescente utilizzo delle fonti rinnovabili è inoltre connesso al riscaldamento globale e alla riduzione dell'effetto serra. Da questo punto di vista il settore elettrico è particolarmente interessante poiché è responsabile di circa un quarto delle emissioni nazionali di gas serra, mostra un andamento di lungo termine della domanda elettrica in crescita ed è caratterizzato da sorgenti emissive puntuali. Tali caratteristiche rendono il settore particolarmente rilevante in relazione alle possibili strategie di riduzione delle emissioni atmosferiche di gas serra. L'Italia ha mostrato negli ultimi anni uno sviluppo notevole delle fonti rinnovabili nel settore elettrico. Secondo i dati TERNA le fonti rinnovabili hanno coperto il 43,1% della produzione lorda nazionale del 2014, mentre nel 2015 si è avuta una sensibile riduzione della quota rinnovabile scesa al 38,5% con un andamento negativo che si annuncia confermato anche per il 2016. La stima delle emissioni provenienti dal parco termoelettrico per i singoli combustibili fossili, insieme alla valutazione della produzione elettrica "carbon free", rappresentano elementi di conoscenza fondamentali per valutare gli effetti ambientali delle strategie di riduzione delle emissioni e di promozione delle fonti rinnovabili nel settore elettrico.

L'Unione europea ha fatto della lotta al cambiamento climatico una delle priorità del suo programma di interventi di cui è espressione la sua politica climatica. Dopo gli obiettivi previsti per il 2020 dal "Pacchetto Clima e Energia", la Commissione Europea ha recentemente proposto nuovi obiettivi di riduzione delle emissioni atmosferiche da raggiungere entro il 2030 (*Clean Energy Package*) che fanno seguito all'accordo raggiunto a Parigi in occasione della COP21. Tali obiettivi prevedono la riduzione delle emissioni totali del 40% rispetto al 1990, l'aumento dell'energia da fonti rinnovabili al 27% del consumo finale e il risparmio del 30% di energia attraverso l'aumento dell'efficienza energetica.

La concentrazione atmosferica dei gas a effetto serra (GHG) rappresenta il principale fattore determinante del riscaldamento globale (IPCC, 2013). Tra i principali gas serra l'anidride carbonica (CO₂) copre un ruolo prevalente in termini emissivi e in termini di forzante radiativo, il parametro che esprime la variazione dei flussi di energia della Terra dovuta ai gas serra. Nel 2011 le emissioni globali di CO₂ di origine fossile hanno rappresentato il 56% del forzante radiativo (IPCC, 2013). La riduzione delle emissioni di CO₂ è la principale strategia di mitigazione dei cambiamenti climatici. Oltre all'utilizzo delle fonti rinnovabili la riduzione delle emissioni può essere raggiunta anche attraverso l'incremento dell'efficienza e l'utilizzo di combustibili a basso contenuto di carbonio (EC, 2011). La stima dell'impatto delle diverse misure mitigative è pertanto un elemento essenziale nella valutazione delle politiche ambientali. A tal proposito l'analisi della decomposizione è stata utilizzata per quantificare l'impatto di differenti fattori determinanti la variazione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂ sia per quanto riguarda la produzione elettrica sia per quanto riguarda i consumi finali.

1 PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

1.1 Produzione termoelettrica e rinnovabile

I dati relativi al sistema elettrico (produzione, potenza installata, consumi, ecc.) sono periodicamente pubblicati da TERNA. Il database di Eurostat riporta inoltre le serie storiche dal 1990 dei dati utilizzati in questo rapporto. Di seguito sono illustrati i risultati relativi ai consuntivi fino al 2015 e le stime preliminari per il 2016 elaborate da ISPRA in base ai dati del Rapporto mensile sul sistema elettrico pubblicato da Terna a dicembre 2016.

Gli impianti per la produzione elettrica con potenza calorifica di combustione superiore a 20 MW fanno parte del sistema ETS, tranne gli impianti per l'incenerimento di rifiuti pericolosi o urbani come previsto dalla Direttiva 2003/87/CE e successive modifiche che istituisce il sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra. Le seguenti elaborazioni riguardano l'intero settore elettrico senza distinzione alcuna tra impianti che fanno parte del sistema ETS e impianti che ne sono esclusi.

I combustibili utilizzati a partire dal 1990 per la produzione termoelettrica sono raggruppati in 5 macrocategorie in relazione alle rispettive caratteristiche fisiche e chimiche: combustibili solidi, gas naturale, gas derivati, prodotti petroliferi, altri combustibili. I combustibili sono stati raggruppati secondo la classificazione adottata da Eurostat al fine di rendere possibile l'elaborazione dei dati per l'intera serie storica soprattutto in riferimento alle emissioni atmosferiche. In altre parole tra i prodotti petroliferi sono considerati i gas di sintesi da processi di gassificazione e i gas residui da processi chimici che Terna considera tra gli altri combustibili. Questi ultimi nella classificazione adottata sono costituiti dalle diverse tipologie di bioenergie (biogas e bioliquidi di diversa origine, biomasse solide) e da rifiuti (CDR e rifiuti solidi urbani e industriali).

La produzione lorda di energia elettrica nel periodo 1990-2015 è passata da 216,6 TWh a 283 TWh con un incremento del 30,7%. I consumi elettrici totali sono passati da 218,8 TWh a 297,2 TWh nello stesso periodo con un incremento del 35,8%. Dopo un periodo di costante crescita della produzione lorda e dei consumi elettrici, dal 2007 si osserva un andamento caratterizzato da ampie oscillazioni con una tendenza al ribasso dovuta ai perduranti effetti della crisi economica. Il saldo import/export rispetto ai consumi elettrici mostra un andamento oscillante intorno alla media del 15,4 % con un andamento in ripresa negli ultimi anni. I dati preliminari del 2016 mostrano tuttavia una repentina diminuzione del saldo import/export che passa da 46,4 TWh nel 2015 a 37 TWh nel 2016.

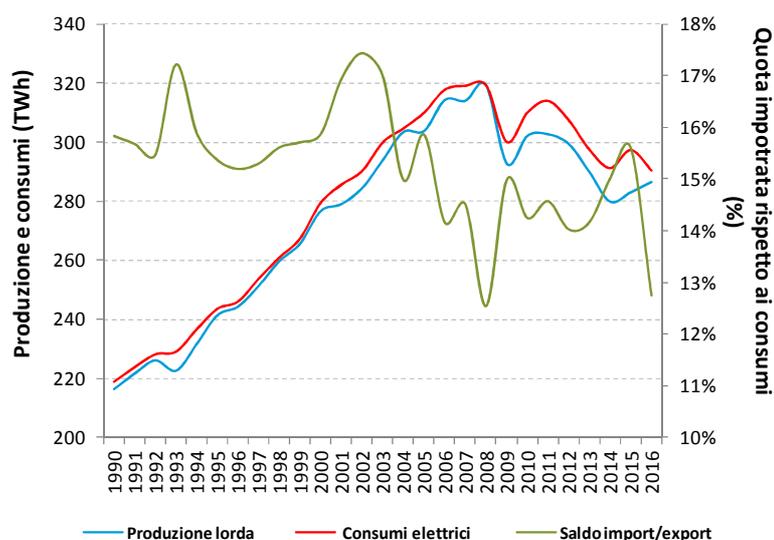


Figura 1.1 – Andamento della produzione e del consumo di energia elettrica. E' riportata inoltre la quota di energia elettrica importata rispetto ai consumi. (Per il 2016 stime Ispra su dati preliminari Terna)

Di seguito è riportata una tabella riepilogativa dei dati di produzione e consumo di energia elettrica.

Tabella 1.1 – Dati di produzione e consumo di energia elettrica.

Energia elettrica	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	TWh										
Produzione lorda	216,6	241,5	276,6	303,7	302,1	302,6	299,3	289,8	279,8	283,0	286,4
<i>apporti da pompaggio</i>	3,5	4,1	6,7	6,9	3,3	1,9	2,0	1,9	1,7	1,4	1,8
Calore utile	-	-	-	53,6	56,3	60,0	56,5	59,1	56,2	59,3	61,3
Energia destinata a servizi ausiliari	11,5	12,3	13,3	13,1	11,3	11,1	11,5	11,0	10,7	10,6	10,8
Produzione netta	205,1	229,2	263,3	290,6	290,7	291,4	287,8	278,8	269,1	272,4	275,6
Energia destinata ai pompaggi	4,8	5,6	9,1	9,3	4,5	2,5	2,7	2,5	2,3	1,9	2,4
Produzione destinata al consumo	200,3	223,6	254,2	281,3	286,3	288,9	285,1	276,3	266,8	270,5	273,2
Saldo import/export	34,7	37,4	44,3	49,2	44,2	45,7	43,1	42,1	43,7	46,4	37,0
Energia elettrica richiesta	234,9	261,0	298,5	330,5	330,5	334,6	328,2	318,5	310,5	316,9	310,3
Perdite di rete	16,2	17,6	19,2	20,6	20,6	20,8	21,0	21,2	19,5	19,7	20,0
Consumi elettrici	218,8	243,5	279,3	309,8	309,9	313,8	307,2	297,3	291,1	297,2	290,3

Per il 2016 dati preliminari Terna e stime Ispra

Per quanto riguarda le stime del 2016 si osserva un incremento della produzione elettrica nazionale rispetto all'anno precedente (+1,2%) e una diminuzione dei consumi elettrici (-2,3%). I dati mostrano un incremento dell'efficienza del sistema elettrico in termini di riduzione della quota di energia destinata ai consumi ausiliari delle centrali. Inoltre, si osserva una diminuzione della quota di perdite di rete. Tuttavia dal 2008 non si osservano andamenti di riduzione consistenti come avvenuto in passato. La quota di consumi ausiliari rispetto alla produzione lorda passa da 5,3% del 1990 a 3,7% del 2015, mentre le perdite di rete rispetto all'energia elettrica richiesta passano da 6,9% a 6,2% nello stesso periodo (Figura 1.2).

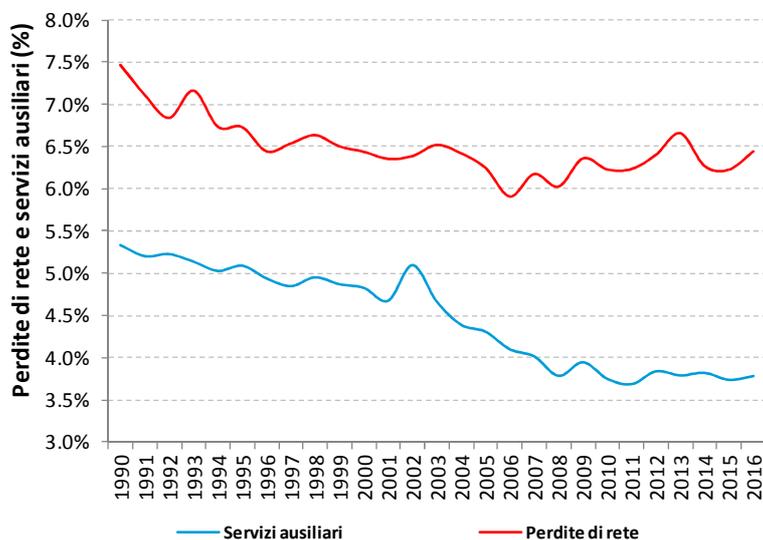


Figura 1.2 – Andamento della quota delle perdite di rete rispetto all'energia elettrica richiesta e della quota dei servizi ausiliari rispetto alla produzione lorda di energia elettrica. (Per il 2016 stime Ispra su dati preliminari Terna)

Nella seguente tabella è riportata la produzione elettrica lorda dalle diverse fonti per il periodo dal 1990 al 2015.

Tabella 1.2 – Produzione elettrica lorda per fonte a partire dal 1990.

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	TWh										
Idroelettrica	35,1	41,9	50,9	42,9	54,4	47,8	43,9	54,7	60,3	47,0	42,8
Termoelettrica	178,3	196,5	221,2	254,2	232,0	229,3	218,3	193,7	176,8	192,6	196,9
Geotermica	3,2	3,4	4,7	5,3	5,4	5,7	5,6	5,7	5,9	6,2	6,2
Eolica e fotovoltaica	0,0	0,0	0,6	2,4	11,0	20,7	32,3	36,5	37,5	37,8	40,5
TOTALE	216,6	241,9	277,4	304,8	302,8	303,4	300,0	290,6	280,5	283,6	286,4

Per il 2016 dati preliminari Terna e stime Ispra

Dal 1990 l'energia elettrica di origine termica rappresenta la quota prevalente della produzione elettrica nazionale. Tuttavia negli ultimi anni, a partire dal 2007, si osserva un costante declino dell'apporto di energia termoelettrica. La percentuale media della produzione termoelettrica lorda dal 1990 al 2015 è pari al 78,1% con un andamento piuttosto variabile e in crescita fino al 2007, quando la quota di energia elettrica di origine termica ha raggiunto l'84,7%. Successivamente al 2007 si registra un rapido declino della quota di energia termoelettrica fino al 63% del 2014, mentre nell'ultimo anno si osserva una ripresa con il 67,9%. La produzione totale di energia elettrica da fonti fossili rappresenta il 60,8% della generazione elettrica nazionale nel 2015 e mostra un declino dopo aver toccato un picco del 82,6% nel 2007.

Il contributo della fonte idroelettrica presenta fluttuazioni legate al regime pluviometrico, con un valore medio pari al 17,5% dal 1990 al 2015. Le fonti non tradizionali – eolico, solare, rifiuti, biocombustibili, biogas – presentano una rapida crescita nell'ultimo decennio (Figura 1.3). La produzione di origine geotermica mostra un andamento in lieve crescita con una quota media pari a 1,7% della produzione elettrica lorda nazionale. La produzione di origine eolica e fotovoltaica mostra una crescita esponenziale, coprendo complessivamente il 13,4% della produzione nazionale del 2015 (5,2% da eolico e 8,1% da fotovoltaico). Nel 2015 si nota un arresto della produzione elettrica da fotovoltaico, con un lieve incremento rispetto all'anno precedente, e una contrazione di energia da fonte eolica. L'energia elettrica prodotta da bioenergie (biogas, bioliquidi, biomasse e quota rinnovabile dei rifiuti) mostra un contributo relativo in costante crescita già a partire dalla prima metà degli anni '90 con una accelerazione che dal 2008 è particolarmente sostenuta e che nel 2015 raggiunge il 6,9% della produzione elettrica nazionale e il 10,1% della produzione termoelettrica tradizionale. Le stime per il 2016 mostrano un incremento della quota termoelettrica che compensa la diminuzione del contributo delle fonti rinnovabili. Tra tali fonti si osserva un significativo incremento della sola fonte eolica mentre la fonte idroelettrica subisce un repentino declino e le restanti fonti restano sostanzialmente invariate rispetto all'anno precedente.

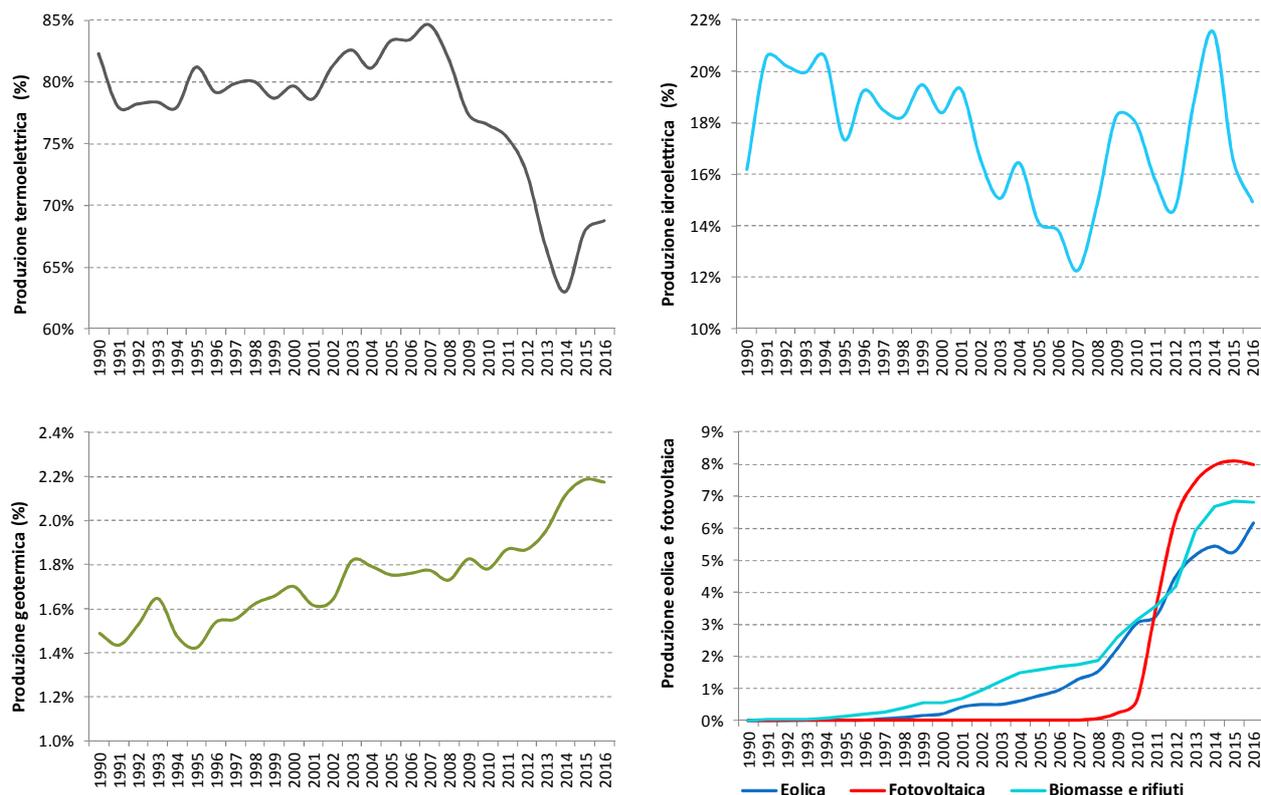


Figura 1.3 – Quota della produzione elettrica lorda nazionale dalle diverse fonti. (Per il 2016 stime Ispra su dati preliminari Terna)

Nella tabella seguente è riportata la produzione elettrica lorda di origine termica per le diverse tipologie di combustibili dal 1990 al 2015.

Tabella 1.3 – Produzione elettrica lorda per combustibile.

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	TWh									
Solidi	32,0	24,1	26,3	43,6	39,7	44,7	49,1	45,1	43,5	43,2
Gas naturale	39,7	47,0	101,4	149,3	152,7	144,5	129,1	108,9	93,6	110,9
Gas derivati	3,7	3,4	4,3	5,8	4,7	5,4	5,0	3,4	3,1	2,2
Prodotti petroliferi	102,7	120,8	85,9	47,1	21,7	19,9	18,9	15,5	14,2	13,4
Altri combustibili	0,1	0,4	1,9	6,2	11,6	13,1	14,8	19,4	21,2	21,8
Totale da combustibili	178,3	195,8	219,7	252,0	230,5	227,7	216,8	192,2	175,5	191,5

Gli ‘altri combustibili’ rappresentano un gruppo eterogeneo di combustibili composto essenzialmente dalle diverse tipologie di bioenergie (biogas e bioliquidi di diversa origine, biomasse solide) e da rifiuti (CDR e rifiuti solidi urbani e industriali). E’ evidente il crescente contributo di tali combustibili che passano da un marginale 0,05% del 1990 al 7,7% del 2015 della produzione elettrica nazionale.

Fino alla prima metà degli anni '90 i prodotti petroliferi, in particolare l’olio combustibile, rivestivano un ruolo prevalente nella generazione elettrica contribuendo alla produzione di circa il 50% dell’energia elettrica di origine termica. Dalla seconda metà degli anni '90, in seguito all’effetto combinato di politiche ambientali mirate alla riduzione delle emissioni inquinanti, l’aumento del prezzo del petrolio e la maggiore efficienza dei cicli combinati rispetto alle caldaie tradizionali, si assiste a una progressiva diminuzione dell’impiego di prodotti petroliferi nel settore termoelettrico e a un contestuale incremento della quota di gas naturale. Nel mix di combustibili fossili un ruolo non irrilevante è ricoperto dal carbone con un contributo medio del 15,7% alla produzione elettrica nel periodo dal 1990 al 2015. In particolare, si osserva un andamento crescente della quota di carbone fin dalla seconda metà degli anni '90 con un picco del 16,4%

raggiunto nel 2012 (22,7% dell'energia elettrica di origine termica). Nel 2015 la quota di carbone rispetto alla produzione elettrica nazionale è stata del 15,3% (22,5% dell'energia elettrica di origine termica).

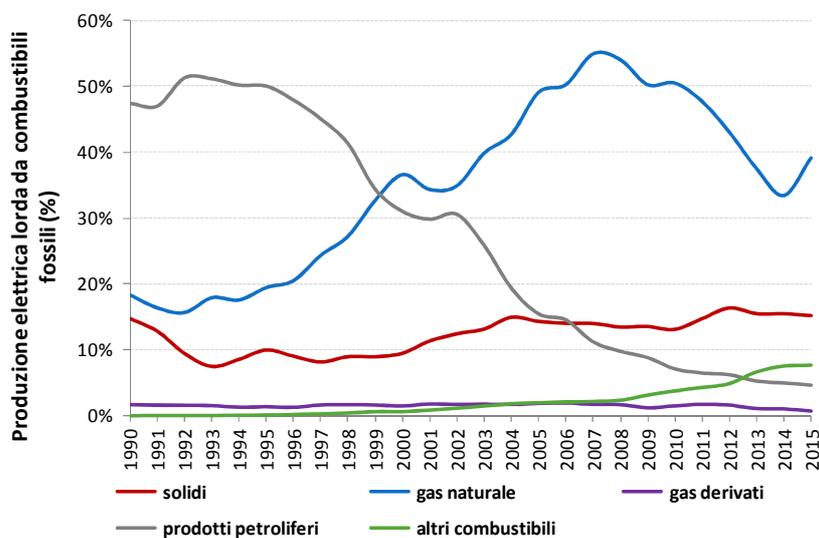


Figura 1.4 – Andamento della quota di energia termoelettrica prodotta per tipologia di combustibile.

I combustibili utilizzati per la produzione elettrica sono caratterizzati da diverse potenzialità di conversione in energia elettrica. L'efficienza di conversione di ciascun combustibile dipende sia dalle proprietà intrinseche del combustibile, principalmente dal potere calorifico, sia dalla tecnologia utilizzata per la produzione elettrica.

Il combustibile con il più elevato rendimento di elettricità, espresso in termini di rapporto tra energia elettrica lorda prodotta e contenuto energetico del combustibile, è il gas naturale seguito dai gas derivati (gas di acciaieria, di altoforno e di cokeria).

Tabella 1.4 – Rendimento elettrico lordo per unità di contenuto energetico di combustibile (Energia elettrica lorda prodotta / Contenuto energetico del combustibile). E' riportato inoltre il consumo specifico medio di combustibili per la produzione elettrica lorda.

Combustibile	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Solidi	39,0%	36,9%	37,9%	38,5%	39,1%	38,4%	38,6%	37,9%
Gas naturale	41,7%	50,8%	53,3%	53,8%	53,6%	55,5%	55,0%	56,5%
Gas derivati	43,7%	39,3%	39,8%	40,2%	41,3%	41,5%	38,9%	41,4%
Prodotti petroliferi	39,0%	42,0%	41,7%	46,1%	45,3%	51,6%	49,3%	49,8%
Altri combustibili	37,5%	26,8%	30,9%	29,2%	30,5%	33,0%	33,8%	36,7%
Totale da combustibili	40,2%	44,8%	46,8%	46,8%	46,3%	46,8%	45,9%	47,6%
Consumo specifico medio di combustibile (MJ/kWh)	8,72	8,03	7,69	7,69	7,78	7,69	7,84	7,56

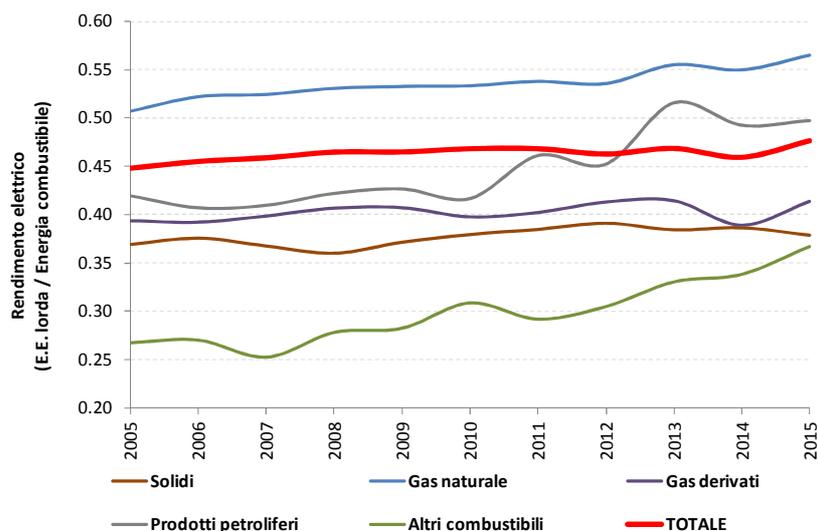


Figura 1.5 – Rendimento elettrico per unità di contenuto energetico di combustibile.

La figura 1.5 mostra come la gran parte dei combustibili presentino rendimenti di conversione oscillanti intorno ad un valore medio o andamenti crescenti. In particolare il gas naturale con raggiunge nel 2015 il rendimento più elevato finora registrato (56,5%). Gli altri combustibili, costituiti da bioenergie e rifiuti, mostrano l'incremento più rilevante dell'efficienza di conversione elettrica, passando da 26,8% nel 2005 a 36,7% nel 2015. Tale incremento è dovuto sia al miglioramento tecnologico del settore elettrico sia all'aumento della quota di biogas e bioliquidi rispetto a rifiuti e biomasse solide, caratterizzati da minore efficienza di conversione elettrica.

L'incremento dell'efficienza media di tutti i combustibili è dovuto principalmente alla diffusione degli impianti a ciclo combinato e alla diffusione di impianti a cogenerazione con produzione di energia elettrica e calore. Per la stessa ragione i prodotti petroliferi mostrano un rilevante incremento dell'efficienza dovuto essenzialmente alla rapida diminuzione della quota di olio combustibile con bassa efficienza di conversione (35,8% nel 2015) e al corrispondente incremento dei gas di sintesi da processi di gassificazione caratterizzati da elevata efficienza di conversione e utilizzati nei cicli combinati (59,7% nel 2015).

La produzione elettrica lorda associata alla produzione di calore è passata dal 27,4% della produzione termoelettrica totale nel 2000 al 50,1% nel 2015. Nel seguente grafico è possibile osservare che l'incremento di produzione elettrica nazionale è stato sostanzialmente soddisfatto da impianti che operano in cogenerazione. Gli impianti che producono solo energia elettrica mostrano infatti un andamento pressoché costante dal 1997 al 2008, successivamente si osserva una forte flessione dei consumi elettrici e una corrispondente flessione della produzione da impianti che non effettuano cogenerazione, mentre gli impianti che producono energia elettrica e calore mostrano un considerevole incremento della produzione fino al 2007 e successivamente oscillano intorno a un valore medio di circa 99 TWh. Negli ultimi anni si assiste a una lieve flessione della produzione da impianti cogenerativi dovuta alla riduzione dei consumi elettrici (Figura 1.6).

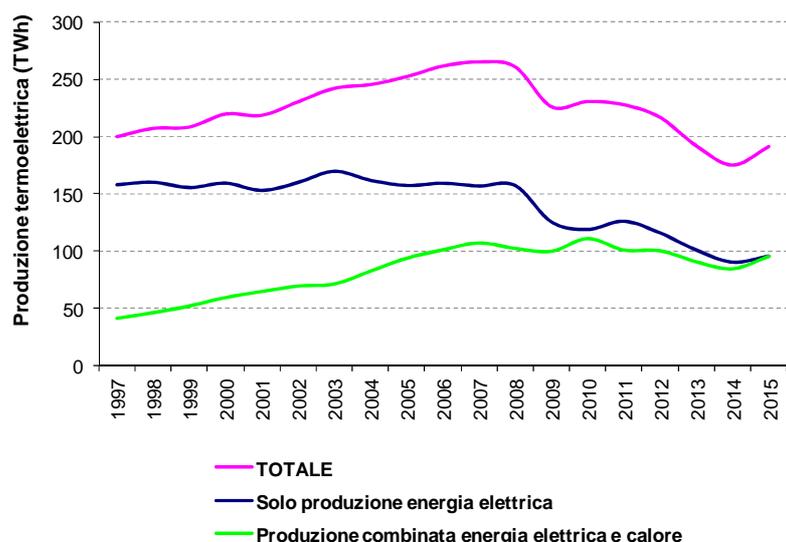


Figura 1.6 – Produzione lorda di energia elettrica per impianti che producono solo energia elettrica e per impianti cogenerativi di energia elettrica e calore.

La produzione elettrica da fonti rinnovabili, al netto della produzione idroelettrica da pompaggi, è stata pari al 38,4% della produzione nazionale nel 2015 (Tabella 1.5).

Tabella 1.5 – Produzione elettrica lorda per fonte rinnovabile. La produzione idroelettrica è riportata al netto della produzione da pompaggi.

Fonte energetica	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	TWh										
Idroelettrica	31,6	37,8	44,2	36,1	51,1	45,8	41,9	52,8	58,5	45,5	41,0
0 - 1 MW	-	1,4	1,6	1,5	2,2	2,2	2,1	2,6	3,1	2,6	-
1 - 10 MW	-	6,0	6,6	6,1	8,7	7,9	7,3	9,4	11,0	8,3	-
> 10 MW	-	30,3	36,1	28,5	40,2	35,8	32,5	40,8	44,4	34,7	-
Eolica	0,0	0,0	0,6	2,3	9,1	9,9	13,4	14,9	15,2	14,8	17,6
Fotovoltaica	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	10,8	18,9	21,6	22,3	22,9	22,9
Geotermica	3,2	3,4	4,7	5,3	5,4	5,7	5,6	5,7	5,9	6,2	6,2
Bioenergie	0,1	0,3	1,5	4,8	9,4	10,8	12,5	17,1	18,7	19,4	19,5
Solidi	-	0,2	0,9	3,6	4,3	4,7	4,7	5,9	6,2	6,3	-
Biogas	-	0,1	0,6	1,2	2,1	3,4	4,6	7,4	8,2	8,2	-
Bioliquidi	-	0,0	0,0	0,0	3,1	2,7	3,1	3,8	4,3	4,9	-
TOTALE	34,9	41,5	51,0	48,6	77,0	83,0	92,2	112,0	120,7	108,9	107,3

Per il 2016 stime Ipsra su dati preliminari Terna.

Negli ultimi anni risulta particolarmente evidente l'incremento della produzione di elettricità da fonte eolica (da 0,6 a 22,9 TWh nel periodo 2000-2015), e dalle bioenergie costituite da biomasse e rifiuti (da 1,5 a 19,4 TWh). Il fotovoltaico mostra una crescita esponenziale fino al 2013 che nei successivi anni si stabilizza e nel 2015 raggiunge 22,9 TWh, con un contributo alla produzione elettrica nazionale pari a 8,1%.

Complessivamente la produzione elettrica da fonti rinnovabili è aumentata di un fattore 2,2 dal 2005 al 2015 ma dopo un picco di 120,7 TWh nel 2014 mostra una riduzione significativa nel 2015, dovuta sia all'arresto dei tassi di crescita delle fonti eolica, fotovoltaica e delle bioenergie sia soprattutto alla riduzione del contributo della fonte idroelettrica. La produzione idroelettrica, tradizionalmente prevalente nel settore delle fonti rinnovabili, rappresenta nel 2015 il 41,8% della produzione elettrica da fonti rinnovabili al netto della produzione da pompaggi. Le prime stime della produzione elettrica del 2016 mostrano che la produzione lorda da fonti rinnovabili subisce una ulteriore diminuzione con circa 107 TWh.

In Figura 1.7 sono riportate le quote della produzione elettrica lorda dalle rispettive fonti dal 1990 al 2015. Dal 1990 risulta evidente un costante incremento del gas naturale a scapito dei prodotti petroliferi. Inoltre, a partire dal 2007 si nota la crescente quota delle fonti rinnovabili che negli ultimi due anni mostra un considerevole declino.

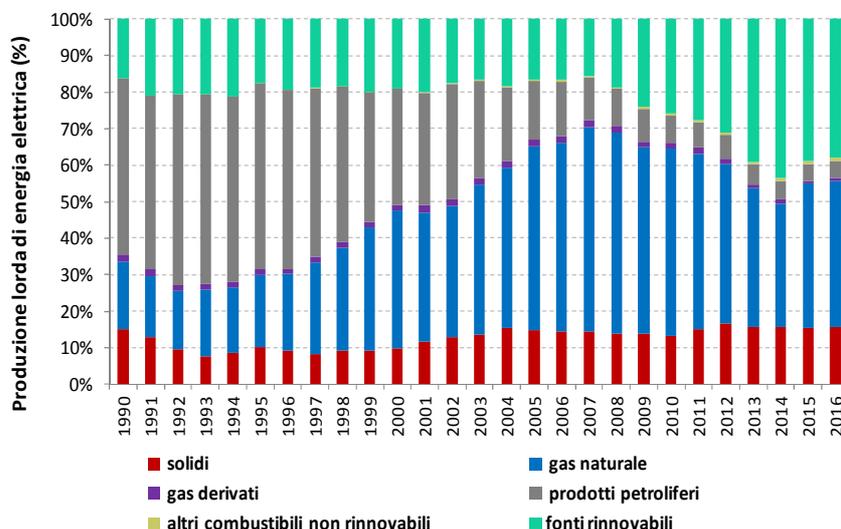


Figura 1.7 – Quota di produzione elettrica lorda per fonte. Per il 2016 stime Ipsra su dati preliminari Terna.

1.1.1 Potenza installata e produzione elettrica

L'andamento della produzione di energia elettrica rispetto alla potenza installata fornisce indicazioni circa l'effettiva attività dei diversi settori della generazione elettrica. In questa esposizione si distinguono il settore termoelettrico, ovvero impianti cogenerativi e non cogenerativi alimentati prevalentemente da combustibili fossili, e il settore delle fonti rinnovabili. E' necessario sottolineare che la produzione elettrica non è direttamente correlata alla potenza efficiente, poiché la produzione è influenzata anche da fattori di mercato e dalla competizione tra le risorse che rendono la produzione e la potenza parzialmente indipendenti. Inoltre per quanto riguarda alcune fonti rinnovabili la produzione elettrica è intrinsecamente aleatoria poiché dipende dalla disponibilità delle rispettive risorse: vento, sole, pioggia. Ad ogni modo il rapporto tra produzione lorda e potenza efficiente installata fornisce una indicazione dell'effettivo utilizzo di una certa tipologia di impianti.

Nelle tabelle 1.6 e 1.7 è riportata la potenza efficiente lorda e la produzione lorda per tipo di impianto nel settore termoelettrico dal 2000 al 2015. La rappresentazione grafica della potenza e della produzione, distinta per impianti cogenerativi e non cogenerativi, mostra che a fronte di un generale incremento della potenza installata fino al 2012 la produzione degli impianti che producono solo energia elettrica subisce un drastico calo a partire dal 2008. Dopo il 2012 si osserva una diminuzione della potenza installata di tali impianti corrispondentemente alla produzione elettrica. Anche gli impianti cogenerativi mostrano un andamento decrescente della produzione di energia elettrica ma con una potenza installata piuttosto stabile nel periodo 2010-2014 e una crescita significativa della potenza nel 2015. (Figura 1.8-1.9).

Gli impianti a ciclo combinato, indipendentemente dalla produzione cogenerativa o non cogenerativa, mostrano un notevole incremento della potenza efficiente lorda, da 7,9 GW nel 2000 a 41,8 GW nel 2015 e rappresentano il 61% della potenza efficiente del settore termoelettrico. La produzione elettrica da tali impianti passa da 43,8 TWh nel 2000 a 105,5 TWh nel 2015. I dati mostrano che il contributo relativo dei cicli combinati alla produzione termoelettrica è cresciuto notevolmente dal 2000 quando era del 20%, ha raggiunto un picco del 68% nel 2010 ed è diminuito negli anni successivi per arrivare al 55,1% nel 2015. La diminuzione del contributo dei cicli combinati è controbilanciata da un incremento della produzione elettrica delle altre tipologie di impianti, come i motori a combustione il cui contributo relativo alla produzione elettrica passa da 1,2% a 10,1% dal 2000 al 2015.

Tabella 1.6 – Potenza efficiente lorda per tipologia di impianto.

Tipologia di impianto	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	GW							
Solo produzione energia elettrica	44,1	46,3	54,0	55,9	57,1	55,3	51,5	42,0
<i>a combustione interna (CI)</i>	0,4	0,5	0,9	1,1	1,4	1,4	1,3	1,2
<i>a turbine a gas (TG)</i>	4,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,1	1,5	2,1
<i>a vapore a condensazione (C)</i>	37,5	24,1	21,8	21,6	21,6	20,9	17,9	13,5
<i>a ciclo combinato (CC)</i>	1,6	12,8	23,1	25,1	25,9	25,2	25,1	22,6
<i>ripotenziato (RP)</i>	-	5,8	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	2,2
<i>turbo espansione (TE)</i>	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
<i>altro genere (V)</i>	-	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Produzione combinata energia elettrica e calore	12,2	18,3	24,4	23,8	23,5	23,2	23,5	26,6
<i>a combustione interna (CIC)</i>	0,4	0,6	1,4	1,8	2,4	2,5	2,8	3,1
<i>a turbine a gas (TGC)</i>	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
<i>a ciclo combinato (CCC)</i>	6,3	12,6	18,9	18,3	17,5	16,9	16,9	19,2
<i>a vapore a contropressione (CPC)</i>	2,0	1,9	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0
<i>a vapore a condensazione con spillam. (CSC)</i>	2,5	2,2	1,8	1,5	1,5	1,7	1,7	2,2
TOTALE	56,3	64,6	78,3	79,7	80,6	78,5	75,0	68,6

Tabella 1.7 – Produzione termoelettrica lorda per tipologia di impianto.

Tipologia di impianto	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	TWh							
Solo produzione energia elettrica	159,6	157,5	119,0	126,2	116,0	100,9	90,4	95,6
<i>a combustione interna (CI)</i>	1,2	1,6	3,0	3,7	4,0	5,5	5,5	5,0
<i>a turbine a gas (TG)</i>	12,4	0,9	0,4	0,3	0,2	2,4	2,5	3,6
<i>a vapore a condensazione (C)</i>	139,1	78,3	52,1	55,9	59,2	54,2	52,5	51,0
<i>a ciclo combinato (CC)</i>	6,9	58,7	62,6	66,0	52,2	38,8	29,8	36,1
<i>ripotenziato (RP)</i>	-	18,1	0,9	0,4	0,3	0,1	0,0	0,0
Produzione combinata energia elettrica e calore	60,1	94,4	111,5	101,5	100,8	91,3	85,2	95,9
<i>a combustione interna (CIC)</i>	1,4	2,3	5,6	7,0	8,2	10,6	12,4	14,4
<i>a turbine a gas (TGC)</i>	5,0	6,1	3,8	4,2	3,9	3,8	4,2	4,7
<i>a ciclo combinato (CCC)</i>	37,0	72,7	94,3	82,9	82,4	70,9	62,5	69,4
<i>a vapore a contropressione (CPC)</i>	6,1	5,3	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,6
<i>a vapore a condensazione con spillam. (CSC)</i>	10,7	8,1	5,4	5,2	4,3	4,3	4,5	5,9
TOTALE	219,7	252,0	230,5	227,7	216,8	192,2	175,5	191,5

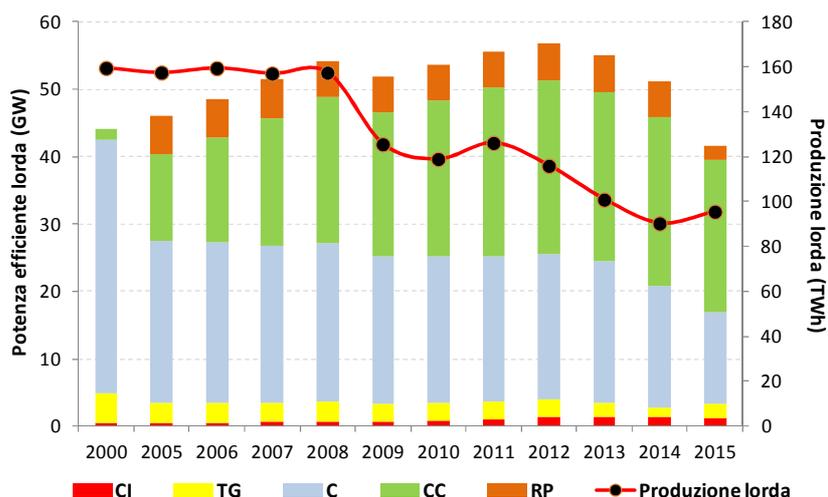


Figura 1.8 – Potenza efficiente lorda per tipologia di impianti termoelettrici e produzione lorda di energia elettrica da impianti che producono solo energia elettrica. CI = a combustione interna; TG = a turbine a gas; C = a vapore a condensazione; CC = a ciclo combinato; RP = ripotenziato.

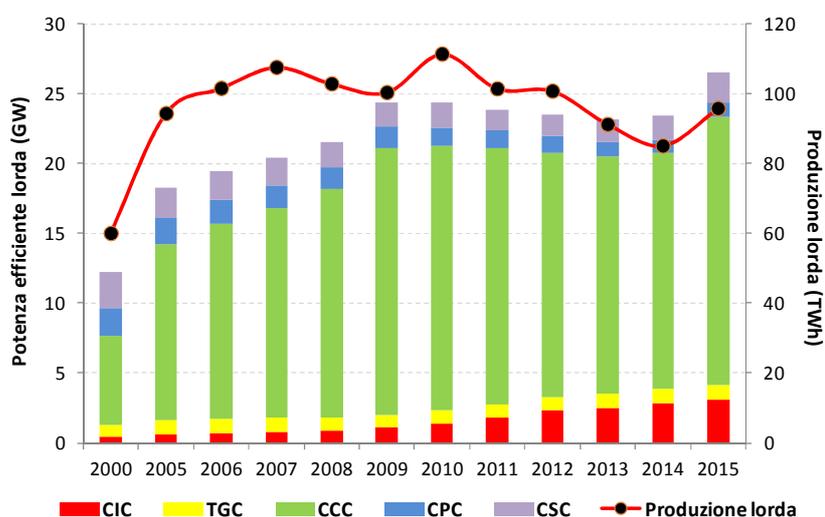


Figura 1.9 – Potenza efficiente lorda per tipologia di impianti termoelettrici e produzione lorda di energia elettrica da impianti che producono energia elettrica e calore. CIC = a combustione interna; TGC = a turbine a gas; CCC = a ciclo combinato; CPC = a vapore a contropressione; CSC = a vapore a condensazione con spillamento.

Per quanto riguarda gli impianti alimentati da fonti rinnovabili si osserva come i diversi meccanismi di incentivazione della produzione elettrica da tali fonti abbiano fornito un notevole impulso al settore. A partire dal 2000 si ha un significativo incremento della capacità installata (Tabella 1.8). Nel 2015 la potenza efficiente lorda è stata di 51,5 GW. Il tasso di incremento interannuale più elevato è stato nel 2011 quando la nuova potenza rispetto all'anno precedente è stata di 11,3 GW, di cui 9,5 GW da fonte fotovoltaica e 1,1 GW da fonte eolica. Gli incrementi interannuali sono diminuiti e nel 2015 si hanno 0,9 GW di nuova potenza, di cui 0,3 GW da fonte fotovoltaica e 0,5 GW da fonte eolica.

Tabella 1.8 – Potenza efficiente lorda per tipologia di fonte rinnovabile.

Fonte energetica	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	MW							
Idroelettrica	16.641	17.326	17.876	18.092	18.232	18.366	18.418	18.543
0 - 1 MW	373	419	523	568	591	645	678	723
1 - 10 MW	1.824	1.986	2.210	2.328	2.396	2.476	2.494	2.575
> 10 MW	14.444	14.920	15.142	15.196	15.245	15.245	15.245	15.245
Eolica	363	1.639	5.814	6.936	8.119	8.561	8.703	9.162
Fotovoltaica	19	34	3.592	13.131	16.758	18.185	18.594	18.892
Geotermica	627	711	772	772	772	773	821	821
Bioenergie	685	1.195	2.352	2.825	3.802	4.033	4.044	4.057
Solo prod. di en. elettrica	286	576	1.427	1.661	2.048	2.097	2.038	2.017
Solidi	133	352	678	741	781	831	807	808
Biogas	153	224	342	418	636	635	610	575
Bioliquidi	-	-	407	502	631	632	620	634
Prod. comb. en. elettrica e calore	399	619	924	1.164	1.753	1.936	2.006	2040
Solidi	372	559	565	547	651	773	803	804
Biogas	27	60	166	355	706	754	796	831
Bioliquidi	-	-	194	261	396	410	407	404
TOTALE	18.335	20.905	30.406	41.756	47.683	49.919	50.580	51.475

La potenza idroelettrica è al netto degli impianti da pompaggio puro

In merito agli impianti alimentati da bioenergie è da sottolineare il rapido incremento dal 2008 al 2013 e la successiva stabilizzazione della potenza efficiente lorda. In particolare gli impianti alimentati a biogas passano da 0,37 GW nel 2008 a 1,39 GW nel 2013, mentre negli anni successivi si osserva solo un lieve incremento della potenza efficiente a 1.41 GW. La crescita degli impianti a bioliquidi nel periodo 2008-2013 appare ancora più rapida (da 0,12 GW a 1,04 GW) seguita da un lieve declino della potenza efficiente. Tale andamento è spiegabile con la diminuzione degli incentivi per questo tipo di impianti il cui sviluppo in futuro non sembra indipendente dalla presenza di forme di incentivazione.

Nella figura 1.10 seguente grafico è evidente come la produzione elettrica mostri un andamento sostanzialmente parallelo a quello della potenza installata.

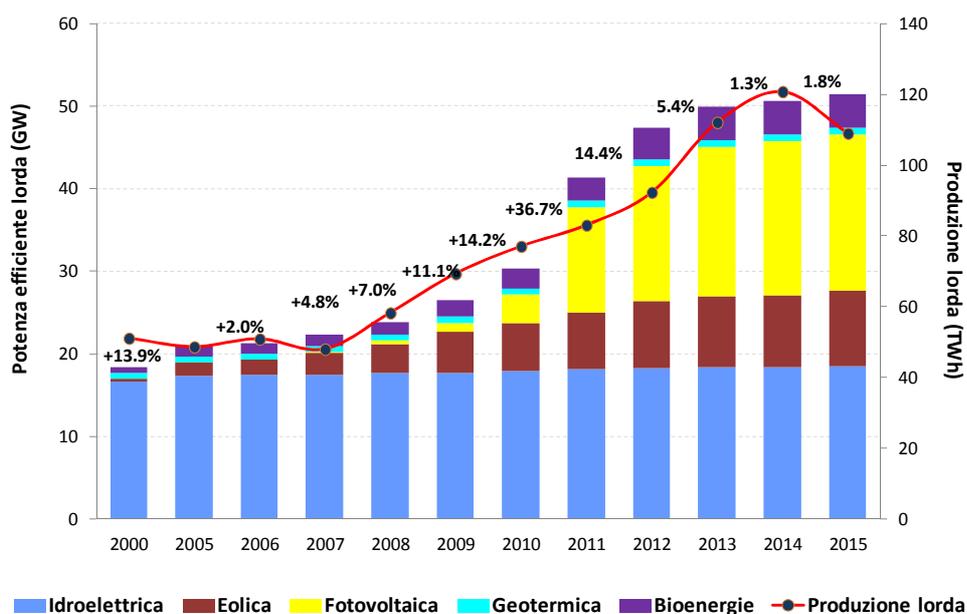


Figura 1.10 – Potenza efficiente lorda degli impianti da fonti rinnovabili e produzione lorda. E' inoltre riportato l'incremento percentuale della potenza efficiente lorda rispetto all'anno precedente.

Di particolare rilievo appare l'incremento del numero medio di ore di utilizzazione equivalenti degli impianti fotovoltaici dal 2010 (Figura 1.11). Le ore di utilizzazione equivalenti sono il numero di ore annue durante le quali un impianto genera elettricità e sono pari al rapporto tra la produzione lorda generata in un anno e la potenza efficiente lorda installata. Considerando la potenza installata e l'energia elettrica prodotta a fine 2015 gli impianti fotovoltaici hanno prodotto per 1.214 ore delle 8.760 disponibili nell'arco dell'anno, con un coefficiente pari al 13,4%, mentre gli impianti eolici hanno fatto registrare un coefficiente di utilizzazione pari al 18,5% con 1.620 ore equivalenti.

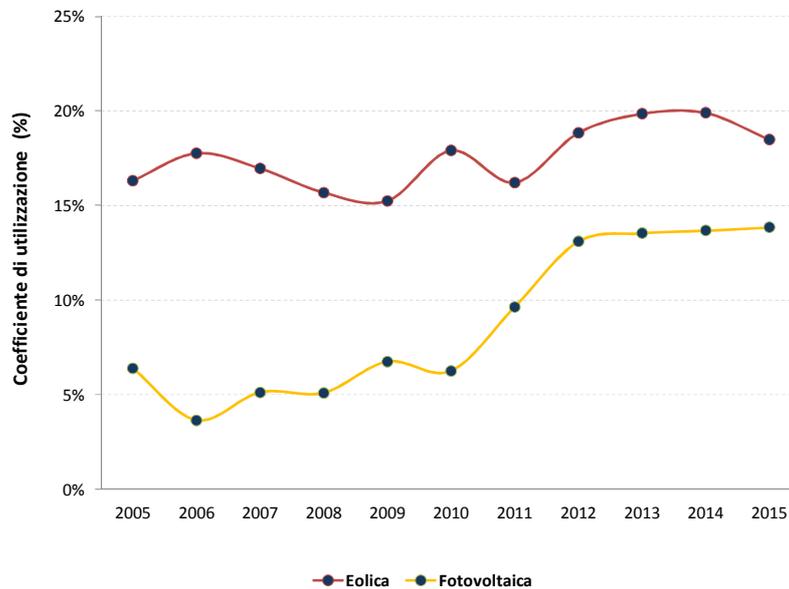


Figura 1.11 – Coefficiente di utilizzazione degli impianti fotovoltaici e eolici.

2 FATTORI DI EMISSIONE DEI COMBUSTIBILI

I fattori di emissione per la produzione e consumo di energia elettrica considerati nel presente articolo sono stati calcolati in base al consumo di combustibili comunicati a ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) da TERNA¹ a partire dal 2005. Per gli anni precedenti sono stati utilizzati i dati Eurostat che a sua volta utilizza i dati presenti nei OECD/Eurostat Joint Questionnaire compilati da TERNA per il settore elettrico. Inoltre sono state elaborate stime preliminari per il 2016 in base ai dati del Rapporto mensile sul sistema elettrico pubblicato da Terna a dicembre 2016 e ai fattori di emissione elaborati per il 2015.

I fattori di emissione dei combustibili utilizzati nella generazione elettrica sono stati calcolati a partire dal contenuto di carbonio e dal potere calorifico dei rispettivi combustibili. Per ognuno dei principali combustibili, quali gas naturale, carbone ed olio combustibile sono state adottate specifiche procedure. Di seguito si riporta una sintesi delle metodologie adottate; per maggiori dettagli si rimanda all'*Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2015 - National Inventory Report 2017*².

Il gas naturale importato è regolarmente analizzato ai contatori di ingresso dagli operatori della rete di trasmissione (SNAM Rete Gas). La composizione chimica e il potere calorifico del gas importato e di quello prodotto sul territorio nazionale sono i principali parametri oggetto delle analisi. I dati sono regolarmente pubblicati da SNAM Rete Gas o comunicati ad ISPRA. In questo modo è possibile stimare, anno per anno, il contenuto medio di carbonio ed il fattore di emissione del gas naturale utilizzato in Italia.

Per quanto riguarda l'olio combustibile la stima dei fattori di emissione è stata elaborata considerando i dati disponibili in letteratura e i risultati delle analisi condotte da ENEL³ su più di 400 campioni. Il contenuto di carbonio dell'olio combustibile presenta variazioni in relazione al contenuto di zolfo, pertanto è possibile stimare il fattore di emissione medio a partire dal mix di olio a basso, medio ed elevato contenuto di zolfo.

Il combustibile solido utilizzato in Italia è solo in minima parte di origine nazionale, la maggior parte viene importato da diversi paesi. I dati relativi alle quantità importate annualmente sono resi disponibili dal Ministero dello Sviluppo Economico (BPT, Bollettino petrolifero trimestrale). Il contenuto di carbonio nel combustibile presenta una relazione con il contenuto di idrogeno e con il potere calorifico inferiore. Il potere calorifico del combustibile solido presenta una elevata eterogeneità in relazione all'umidità e al contenuto in ceneri, parametri che possono rendere estremamente incerta la stima del contenuto di carbonio. La qualità delle stime può essere pertanto migliorata considerando l'umidità del carbone. Attualmente i limiti della stima del fattore di emissione del carbone sono superati con la seguente procedura:

ENEL ha analizzato più di 200 campioni di carbone importato in un paio di anni per determinare un ampio set di parametri. In tal modo è stato possibile correlare il potere calorifico inferiore e il contenuto di carbonio alle caratteristiche medie del carbone calcolate a partire da dati di letteratura (EMEP/CORINAIR, 2007);

- per ogni anno è possibile calcolare la media pesata del potere calorifico inferiore e il contenuto di carbonio del carbone importato utilizzando i dati di letteratura;
- utilizzando i valori calcolati e la correlazione individuata è possibile stimare il contenuto di carbonio medio del carbone. Dal 2005 la disponibilità di dati sul contenuto di carbonio presente nei combustibili utilizzati dai singoli impianti per ogni anno consente di affinare la stima.

A partire dal 2005 i fattori di emissione di una serie di combustibili (carbone da vapore, coke di petrolio, gas derivati, gas di raffineria, gas di sintesi, gas residui da processi chimici) sono stati calcolati in base ai dati comunicati al Comitato nazionale per la gestione della Direttiva 2003/87/CE dagli impianti che rientrano nel sistema *Emissions Trading Scheme* (ETS). Tali dati sono soggetti ad un processo di verifica che "*accerta l'affidabilità, credibilità e precisione dei sistemi di monitoraggio, dei dati e delle informazioni presentate e*

¹ Principale proprietario della Rete di Trasmissione Nazionale di energia elettrica ad alta tensione.

² Allegato 6, *National emission factors*.

³ ENEL, comunicazione dei dati ad ISPRA.

riguardanti le emissioni rilasciate dall'impianto.” (D. Lgs 4 aprile 2006, n. 216, art. 16, c.1). La verifica dei dati pervenuti al Comitato rendono i dati particolarmente utili e affidabili per valutare le caratteristiche dei diversi combustibili ed il relativo uso nel parco termoelettrico italiano. Precedentemente al 2005 sono stati utilizzati fattori di emissione disponibili in letteratura o da raccolte dati presso gli impianti industriali.

In tale studio i fattori di emissione di CO₂ da combustione di biomasse (biodiesel, biogas, biomasse, oli vegetali e componente biodegradabile dei rifiuti) sono stati considerati pari a zero, in accordo con quanto definito nell'ambito della convenzione UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) per la contabilizzazione delle emissioni atmosferiche di anidride carbonica. In tale contesto la biomassa è una sorgente neutra rispetto alle emissioni di CO₂, in quanto la CO₂ emessa durante la combustione è pari a quella assorbita nel corso della vita della pianta con il processo di fotosintesi.

I fattori di emissione dei principali combustibili di origine fossile utilizzati per la produzione elettrica utilizzati in questo lavoro sono pubblicati in *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2015, National Inventory Report 2017*, (Allegato 6).

I coefficienti di ossidazione dei combustibili sono stati aggiornati secondo le indicazioni delle linee guida IPCC 2006 per la realizzazione degli inventari nazionali (IPCC, 2006). Tali linee guida considerano il fattore di ossidazione dei combustibili pari a 1 se non sono disponibili informazioni più dettagliate. In altre parole si considera interamente convertito in anidride carbonica il contenuto di carbonio del combustibile durante il processo di combustione in assenza di dati analitici sulla combustione.

Le emissioni del settore elettrico sono elaborate separatamente in relazione alla produzione di elettricità e di calore. Sebbene le emissioni per la produzione cogenerativa di energia elettrica ed energia termica non sono eventi indipendenti, appare opportuno separare le due entità considerando l'uso selettivo delle due tipologie di energia da parte degli utenti finali.

2.1 Emissioni di CO₂ dal settore termoelettrico

La quantità CO₂ atmosferica emessa nel 2015 in seguito alla produzione di energia elettrica e calore è stata di 106,7 (di cui 93,6 Mt per la generazione elettrica), pari al 30% delle emissioni nazionali di anidride carbonica (357,2 Mt CO₂) e 25% delle emissioni di gas serra, pari a 433 Mt CO_{2eq} (ISPRA, 2017). Gli impianti termoelettrici costituiscono la principale sorgente emissiva del settore delle industrie energetiche che, ai fini dell'Inventario Nazionale delle Emissioni, comprende anche le raffinerie e le cokerie; nello stesso settore sono inoltre comprese le emissioni fuggitive. Le emissioni fuggitive sono dovute alle perdite di metano dalle reti di distribuzione, dai campi di coltivazione degli idrocarburi e dallo stoccaggio di combustibili fossili. Nel 2015 il settore delle industrie energetiche ha emesso 105,3 Mt CO₂. Va tuttavia precisato che le emissioni atmosferiche da generazione elettrica comprese nel settore sono relative all'energia elettrica direttamente immessa in rete, mentre le emissioni dovute alla produzione di energia elettrica destinata all'autoconsumo sono annoverate nei settori di appartenenza delle rispettive attività (raffinerie, cokerie e acciaierie, industrie manifatturiere e altro). Inoltre una quota significativa dell'elettricità prodotta dall'incenerimento dei rifiuti è riportata nel settore dei servizi.

La figura 2.1 mostra il confronto tra le emissioni di anidride carbonica originate dai diversi settori nel 1990, 2005, e 2015.

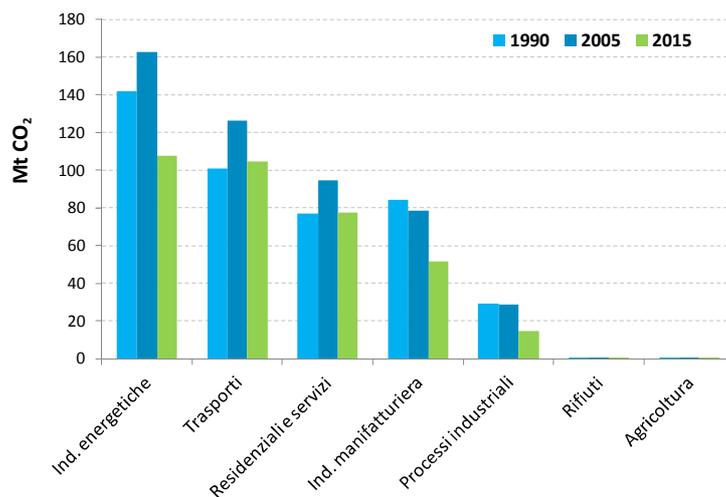


Figura 2.1 – Emissioni di anidride carbonica per settore.

Nel 2015 in seguito alla generazione di energia elettrica viene emessa in atmosfera una quantità di CO₂ inferiore alle emissioni di CO₂ provenienti dal settore dei trasporti (104,8 Mt CO₂), considerando anche le emissioni dovute alla produzione di calore le emissioni del settore elettrico sono lievemente superiori a quelle del settore dei trasporti. Le caratteristiche delle sorgenti emissive dei due settori consentono una maggiore potenzialità di riduzione delle emissioni per il settore elettrico rispetto al settore dei trasporti. Il settore elettrico è infatti caratterizzato da poche decine di sorgenti fisse di grandi dimensioni, mentre il settore dei trasporti è caratterizzato da milioni di sorgenti mobili di piccole dimensioni. Nel seguente grafico è evidente la forte correlazione tra le emissioni di CO₂ dal settore delle industrie energetiche e le emissioni del settore elettrico. Inoltre si nota come in un contesto di diminuzione delle emissioni dai settori considerati quelle dei trasporti superino le emissioni del settore elettrico nel 2014. Nel periodo dal 2005 al 2015 le industrie energetiche mostrano una sensibile riduzione delle emissioni di CO₂ (-33,7%), mentre nel settore dei trasporti, in seguito alla contrazione negli ultimi anni a causa della crisi economica, le emissioni del 2015 sono scese del 17,1% rispetto a quelle del 2005 e continuano a essere più elevate di quelle registrate nel 1990 (+4%).

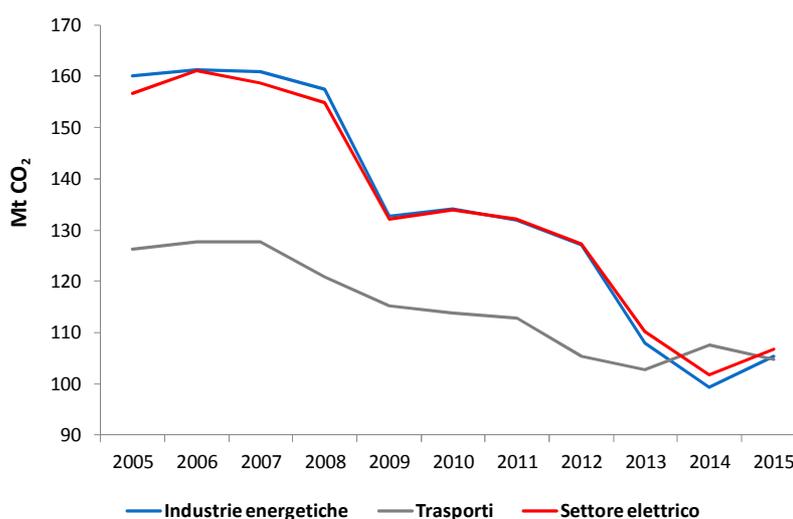


Figura 2.2 – Andamento delle emissioni di CO₂ da industrie energetiche, trasporti e dal settore elettrico.

Nella seguente tabella sono riportate le emissioni totali dal settore termoelettrico per la produzione di energia elettrica e energia termica.

Tabella 2.1 – Emissioni di anidride carbonica dal settore termoelettrico per combustibile dal 1990. Stime preliminari per il 2016.

Combustibili	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	Mt CO₂										
Solidi	28,1	20,8	22,4	40,2	35,5	39,3	42,5	39,9	38,3	39,1	40,1
Gas naturale	21,1	24,4	48,7	66,6	67,6	63,4	57,7	48,5	42,8	49,2	50,5
Gas derivati	6,7	6,4	6,4	11,4	8,0	9,0	8,2	5,9	6,0	4,5	4,6
Prodotti petroliferi	70,2	81,4	61,2	36,2	19,7	16,9	15,4	12,4	10,9	10,2	10,5
Altri combustibili	0,1	0,2	0,5	2,1	3,2	3,5	3,4	3,4	3,7	3,8	3,9
Totale	126,2	133,2	139,2	156,6	134,0	132,0	127,2	110,1	101,7	106,7	109,5

Come visto in precedenza la produzione di energia elettrica da fonti fossili rappresenta il 60,8% della generazione elettrica nazionale nel 2015. Le emissioni atmosferiche di CO₂ dovute alla combustione di prodotti petroliferi hanno rappresentato, fino alla prima metà degli anni '90, una quota rilevante delle emissioni totali del settore termoelettrico. Nel 1995 la quota emissiva da prodotti petroliferi ammontava al 61,1% delle emissioni per la generazione termoelettrica. Successivamente la quota di CO₂ da prodotti petroliferi è costantemente diminuita fino ad arrivare al 9,6% delle emissioni del settore termoelettrico nel 2015. Va tuttavia considerato che tra i prodotti petroliferi sono annoverati anche i gas di sintesi da processi di gassificazione che a partire dal 2000 rappresentano una quota crescente dei prodotti petroliferi. Considerando solo l'olio combustibile la quota emissiva rispetto alle emissioni del settore elettrico passa da 61,1% a 2,7% nel periodo 1995-2015.

In tabella 2.2 sono riportate le sole emissioni dovute alla produzione elettrica.

Tabella 2.2 – Emissioni di anidride carbonica dal settore termoelettrico per la produzione di energia elettrica per combustibile dal 1990. Stime preliminari per il 2016.

Combustibili	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	Mt CO₂										
Solidi	28,1	20,8	22,4	39,9	35,3	39,1	42,4	39,8	38,1	38,9	39,9
Gas naturale	21,1	24,4	48,7	59,1	59,3	55,2	49,6	40,3	34,9	40,5	41,5
Gas derivati	6,7	6,4	6,4	11,1	7,8	8,8	7,4	5,4	5,5	3,6	3,6
Prodotti petroliferi	70,2	81,4	61,2	31,8	14,8	12,2	11,9	8,8	8,3	7,6	7,7
Altri combustibili	0,1	0,2	0,5	1,8	3,0	3,2	3,1	3,0	3,2	3,1	3,2
Totale	126,2	133,2	139,2	143,8	120,2	118,5	114,5	97,3	90,1	93,6	96,0

Le emissioni atmosferiche dovute al gas naturale mostrano un notevole incremento dal 1990 in ragione dell'aumento del consumo di tale risorsa fossile. La quota di CO₂ emessa per combustione di gas naturale passa infatti dal 16,7% nel 1990 al 49,3% nel 2010 e diminuisce fino al 38,8% nel 2014 per risalire al 43,2% nel 2015. La quota di emissioni da combustibili solidi, principalmente carbone, si è ridotta dal 1990 (22,3%) fino al 1993 (12,2%). Dopo un periodo di relativa stabilità fino al 2000 si osserva una rapida ascesa della quota emissiva dei combustibili solidi fino a superare il 40% delle emissioni del settore elettrico (Figura 2.3). Nel 2014 le emissioni da combustibili solidi sono superiori a quelle del gas naturale.

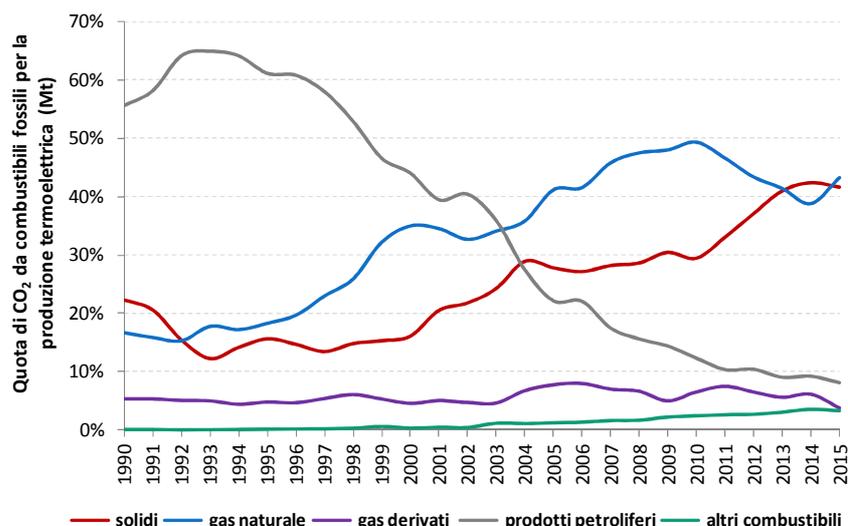


Figura 2.3 – Andamento della quota emissiva per tipologia di combustibile.

Nella Figura 2.4 viene rappresentato l'andamento delle emissioni atmosferiche di CO₂ originate dalla combustione delle diverse fonti fossili per la produzione elettrica.

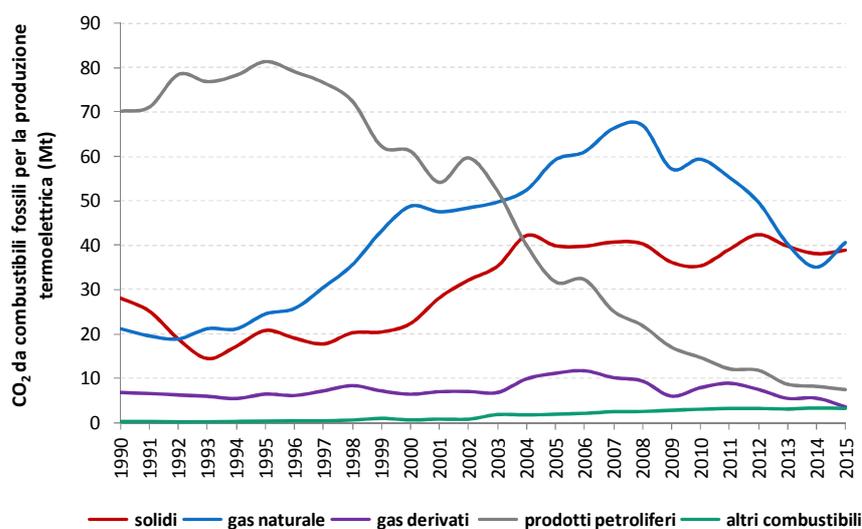


Figura 2.4 – Andamento delle emissioni da produzione termoelettrica per combustibile.

2.1.1 Fattori di emissione di CO₂ per la produzione e il consumo di energia elettrica

In Tabella 2.3 sono riportati i fattori di emissione specifici per le diverse tipologie di combustibili utilizzati nelle centrali termoelettriche nazionali. Tra i combustibili fossili i gas derivati presentano i fattori di emissione più elevati, seguiti dai combustibili solidi e dai prodotti petroliferi; il gas naturale mostra i fattori di emissione più bassi. Gli altri combustibili meritano un discorso a parte poiché prevalentemente costituiti da rifiuti e bioenergie. I fattori di emissione di tali combustibili sono tra i più elevati se si considera la produzione elettrica dalla sola componente non biodegradabile dei rifiuti, tra i quali figurano anche i rifiuti industriali.

Tabella 2.3 – Fattori di emissione di anidride carbonica da produzione termoelettrica lorda per combustibile.

Combustibili	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	gCO ₂ /kWh lorda									
Solidi	876,9	863,2	852,0	914,9	889,7	873,7	862,5	882,1	876,7	899,9
Gas naturale	530,2	519,1	480,4	396,2	388,2	381,8	384,5	369,8	373,1	365,0
Gas derivati	1.816,4	1.855,8	1.498,3	1.906,3	1.664,9	1.630,0	1.495,9	1.606,0	1.793,9	1.624,8
Prodotti petroliferi	683,5	674,0	713,0	675,1	681,1	614,9	629,4	566,0	584,9	564,6
Altri combustibili^[1]	1,231,6	540,0	265,0	296,8	256,6	240,9	212,9	156,4	153,1	144,0
Altri combustibili^[2]	2.463,1	2.439,8	1.253,1	1.394,8	1.385,8	1.373,1	1.385,9	1.322,5	1.323,1	1.294,3
Totale termoelettrico^[1]	708,0	680,6	633,6	570,6	521,7	520,3	528,0	506,1	513,2	488,9
Totale termoelettrico^[2]	708,2	681,7	638,0	581,8	544,0	546,3	560,3	555,5	574,5	544,0

^[1] E' compresa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.

^[2] E' esclusa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.

Il fattore di emissione per la produzione termoelettrica lorda nazionale presenta una costante diminuzione dal 1990 al 2015, con valori che vanno da 708 g CO₂/kWh a 488,9 g CO₂/kWh. La diminuzione del fattore di emissione è dovuta principalmente all'incremento della quota di gas naturale nella produzione termoelettrica e alla continua diminuzione del suo fattore di emissione specifico, diminuzione dovuta a sua volta all'incremento dell'efficienza di conversione elettrica degli impianti alimentati da questo combustibile. Un ruolo importante assume anche l'utilizzo di bioenergie con bilancio emissivo zero tra gli altri combustibili che nel 2015 contribuiscono per il 7,7% della produzione termoelettrica, mentre nel 1990 il contributo era dello 0,05% e nel 2000 dello 0,7%. La differenza tra i fattori di emissione del parco termoelettrico con e senza il contributo delle bioenergie mostra il ruolo di tali fonti nella riduzione del fattore di emissione. La differenza diventa rilevante successivamente al 2000 in seguito all'incremento della quantità di biomasse solide e di rifiuti solidi urbani o assimilabili utilizzati per la produzione elettrica e all'ancora più rilevante incremento di bioliquidi e biogas osservato successivamente al 2008.

In figura 2.5 si osserva la variazione percentuale di energia termoelettrica prodotta e delle relative emissioni atmosferiche di CO₂ rispetto al 1990 per tipologia di combustibile. Per i combustibili solidi, prodotti petroliferi e gas derivati si osserva una sostanziale covariazione dei due parametri, mentre per il gas naturale e gli altri combustibili si osserva un incremento maggiore della produzione elettrica rispetto all'incremento osservato per le emissioni di CO₂. In altre parole per gas naturale e altri combustibili si ha un incremento della produzione elettrica a parità di emissioni di anidride carbonica, ovvero un disaccoppiamento tra i due parametri. Tale configurazione trova spiegazione in diversi fattori, come l'incremento di efficienza della produzione elettrica o la variazione della composizione di combustibili con utilizzo di risorse caratterizzate da minori emissioni specifiche.

Il fattore di disaccoppiamento tra i due parametri può essere considerato in termini di rapporto tra i rispettivi incrementi. Per gli 'altri combustibili' l'incremento di energia elettrica nel 2015 è 8,55 volte più grande dell'incremento delle emissioni, mentre per gas naturale il fattore di disaccoppiamento è 1,45. Anche per i prodotti petroliferi si osserva un fattore di disaccoppiamento pari a 1,21 essenzialmente dovuto alla crescente quota dei gas di sintesi a elevata efficienza di conversione elettrica. Il combustibile solido presenta un disaccoppiamento addirittura negativo (0,97), sintomo di un fattore emissivo specifico che supera gli effetti dell'efficienza di conversione elettrica. Per l'intero parco termoelettrico si osserva un fattore di disaccoppiamento pari a 1,45 con un andamento crescente che ricalca quello del gas naturale.

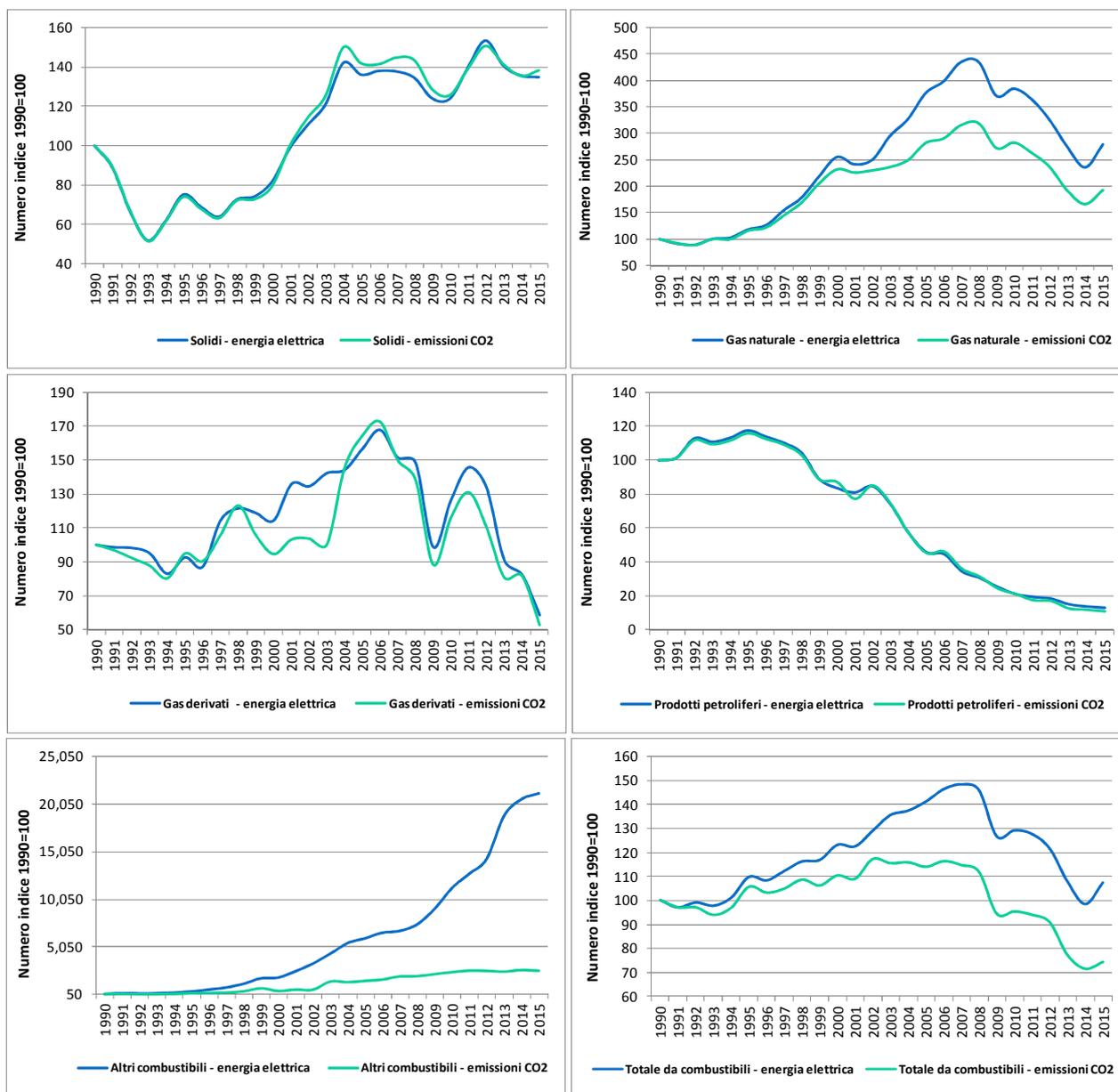


Figura 2.5 - Variazione annuale della produzione termoelettrica e delle emissioni per combustibile (1990=100).

Da quanto esposto emerge che il parco termoelettrico nazionale presenta, a partire dal 1990, un incremento della produzione elettrica cui non è corrisposto un proporzionale incremento delle emissioni atmosferiche di CO₂ per via del miglioramento tecnologico e per l'incremento della quota di combustibili con fattori di emissione inferiori. Le emissioni di CO₂ di origine termoelettrica hanno raggiunto il punto più elevato nel 2002 con un incremento del 17,1% rispetto al 1990, mentre la produzione termoelettrica mostrava nello stesso periodo un incremento del 29,2%. Dal 2002 al 2007 le emissioni erano sostanzialmente stabili con un incremento del 14,6% rispetto al 1990 e una produzione termoelettrica cresciuta del 48,5%. Successivamente al 2007, in seguito alla contrazione del sistema economico innescata dalla crisi economico-finanziaria i cui effetti perdurano, si osserva una riduzione della produzione elettrica e delle emissioni di CO₂. Le emissioni del settore termoelettrico nel 2015 sono diminuite del 25,9% rispetto al 1990, a fronte di un incremento della produzione termoelettrica del 7,4% nello stesso periodo.

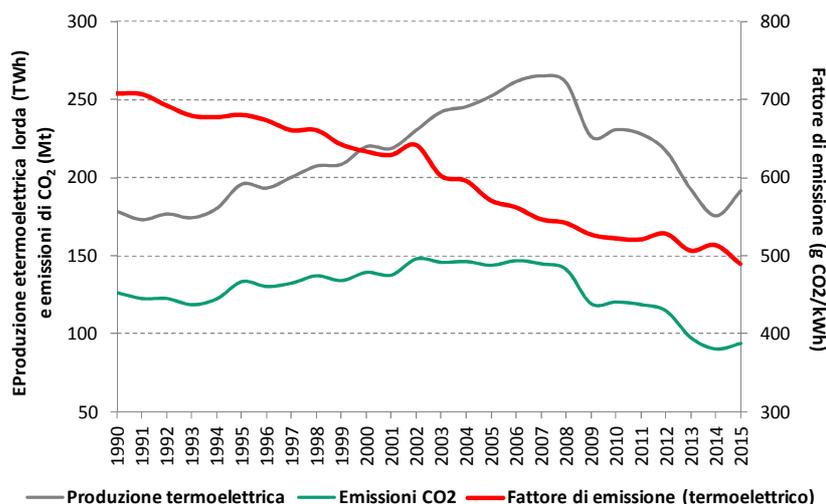


Figura 2.6 - Andamento della produzione termoelettrica, delle emissioni di CO₂ e del corrispondente fattore di emissione.

Nel grafico successivo è riportato l'andamento dei fattori di emissione della CO₂ dal 1990 al 2015 per la produzione elettrica lorda di origine fossile, per la produzione elettrica lorda totale, comprensiva quindi dell'energia elettrica da fonti rinnovabili. E' inoltre riportato il fattore di emissione per il consumo di energia elettrica a livello di utenza. I fattori di emissione relativi alla produzione elettrica considerano la produzione lorda, misurata ai morsetti dei generatori elettrici. Per il calcolo dei fattori di emissione dei consumi va considerata la produzione netta di energia elettrica, ovvero l'energia elettrica misurata in uscita dagli impianti al netto dell'energia elettrica utilizzata per i servizi ausiliari della produzione, la quota di energia elettrica importata e le perdite di rete. Le emissioni atmosferiche di CO₂ dovute alla produzione dell'energia elettrica importata dall'estero non entrano nel novero delle emissioni nazionali. La quota del saldo import/export rispetto ai consumi elettrici nazionali è piuttosto stabile dal 1990 (media 15,4% dei consumi elettrici), mentre le perdite di rete passano da 7,4% a 6,6% dei consumi nazionali nello stesso periodo.

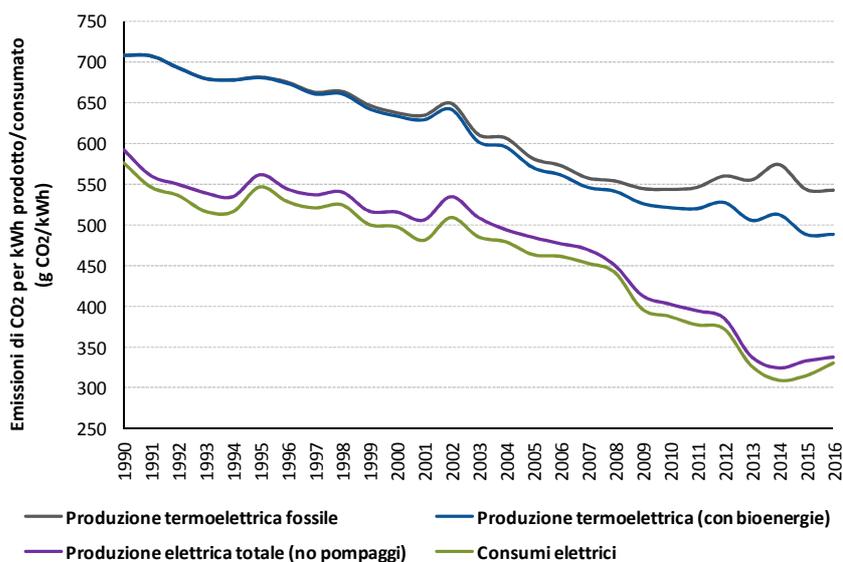


Figura 2.7 - Andamento del fattore di emissione per la produzione lorda ed il consumo di energia elettrica (g CO₂/kWh). Per il 2016 stime preliminari.

La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili determina una riduzione del fattore di emissione per la produzione elettrica totale poiché tali fonti hanno un bilancio emissivo pari a zero (Tabella 2.4). Il

fattore di emissione per consumo di energia elettrica si riduce ulteriormente in ragione della quota di energia elettrica importata dall'estero le cui emissioni atmosferiche sono originate fuori dal territorio nazionale.

I dati relativi alle emissioni dal parco termoelettrico e della produzione elettrica nazionale mostrano che a fronte di un incremento della produzione elettrica dal 1990 al 2013 pari a 72,9 TWh si è registrata una diminuzione delle emissioni atmosferiche di anidride carbonica di 29 Mt.

Tabella 2.4 – Fattori di emissione della produzione elettrica nazionale e dei consumi elettrici

Anno	Produzione termoelettrica lorda (solo fossile)	Produzione termoelettrica lorda ¹	Produzione elettrica lorda ²	Produzione elettrica lorda e calore ³	Consumi elettrici
	g CO ₂ /kWh				
1990	708,2	708,0	592,3	592,3	577,0
1995	681,7	680,6	561,3	561,3	547,3
2000	638,0	633,6	515,6	515,6	498,3
2005	581,8	570,6	484,3	446,8	464,0
2006	573,4	561,8	476,8	440,6	461,9
2007	557,9	546,5	469,4	435,0	453,6
2008	554,3	541,6	449,9	420,1	442,1
2009	545,0	526,8	413,0	390,0	397,0
2010	544,0	521,7	402,4	377,5	388,0
2011	546,3	520,3	394,1	366,2	377,6
2012	560,3	528,0	385,1	359,6	372,6
2013	555,5	506,1	337,9	317,4	327,3
2014	574,5	513,2	323,9	304,2	309,4
2015	544,0	488,9	332,4	313,1	315,0
2016	542,9	488,9	337,1	316,5	330,6

¹ comprensiva della quota di elettricità prodotta da bioenergie

² al netto degli apporti da pompaggio

³ considerate anche le emissioni di CO₂ per la produzione di calore (calore convertito in kWh)

2.1.2 Emissione di altri gas a effetto serra del settore elettrico

La generazione di energia elettrica e calore comporta anche l'emissione in atmosfera di metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O). Sebbene tali gas siano emessi in quantità estremamente limitata rispetto all'anidride carbonica, sono caratterizzati da elevati potenziali di riscaldamento globale.

Di seguito sono riportate le emissioni di tali gas espressi in termini di CO₂ equivalente, a valle della considerazione dei rispettivi potenziali di riscaldamento globale dei due gas (25 per il metano e 298 per protossido di azoto) stimate da ISPRA nel contesto dell'Inventario delle emissioni nazionali elaborato da ISPRA (2017).

La stima delle emissioni di gas serra è riferita agli impianti prevalentemente dedicati alla produzione elettrica e alla fornitura in rete dell'elettricità prodotta (Settore 1.A.1.a. del CRF, ISPRA 2017), escludendo quindi la produzione elettrica nel settore industriale (siderurgico, raffinerie, cartiere, ecc). L'eterogeneità di tale settore rende poco affidabile la stima dei fattori di emissione per i gas serra diversi dalla CO₂. Gli impianti considerati per la stima delle emissioni totali di gas serra rappresentano mediamente il 73,8% dei consumi energetici per la produzione termoelettrica nazionale del periodo 2005-2015.

Di seguito è riportata una tabella delle emissioni di gas serra per gli impianti esclusivamente dedicati alla produzione elettrica fornita in rete.

Tabella 2.5 – Fattori di emissione di gas serra da impianti esclusivamente dedicati alla produzione elettrica fornita in rete e calore.

Gas serra	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	Mt CO _{2eq}									
CO ₂	107,16	109,47	115,69	120,27	93,80	92,39	91,73	78,70	71,39	78,72
CH ₄	0,09	0,10	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
N ₂ O	0,31	0,29	0,27	0,31	0,26	0,29	0,30	0,29	0,29	0,29
GHG	107,56	109,86	116,06	120,68	94,14	92,77	92,12	79,08	71,76	79,09

I dati mostrano che dal 2005 al 2015 la percentuale di metano e protossido di azoto incide sulle emissioni del settore considerato da 0,3% a 0,5% delle emissioni di gas serra totali con un valore medio pari a 0,4%.

In termini di emissioni di anidride carbonica gli impianti considerati rappresentano emettono dal 70% al 76,8% delle emissioni dell'intero settore elettrico nel periodo 2005-2015 con una percentuale media del 73,1%. Il contenuto energetico dei combustibili utilizzati da tali impianti è mediamente il 73,6% dell'energia totale impiegata nel settore per la produzione di energia elettrica e calore nel periodo 2005-2015.

Nella seguente tabella è riportato, per il periodo 2005-2015, il contenuto energetico dei combustibili utilizzati nell'intero settore elettrico per la produzione di energia elettrica e calore e il contenuto energetico dei combustibili considerati nel settore 1.A.1.a. del CRF.

Tabella 2.6 – Contenuto energetico dei combustibili utilizzati nel settore elettrico e nel settore 1.A.1.a. del CRF per la produzione di energia elettrica e calore.

Energia combustibili	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	PJ										
Settore elettrico	2.237	2.298	2.304	2.238	1.956	1.998	1.995	1.911	1.720	1.602	1.688
<i>di cui (per produzione di energia elettrica)</i>	2.023	2.064	2.076	2.017	1.750	1.772	1.750	1.686	1.477	1.375	1.447
Settore 1.A.1.a. CRF	1.785	1.808	1.823	1.712	1.474	1.428	1.411	1.371	1.180	1.072	1.185

3 ANALISI DELLA DECOMPOSIZIONE

L'analisi della decomposizione è una tecnica che consente di studiare la variazione di un indicatore in un determinato intervallo temporale in relazione alla variazione dei suoi determinanti. In altre parole la variazione di un parametro viene decomposta nella variazione dei parametri che lo determinano.

Il punto di partenza dell'analisi è la costruzione di un'identità, dove la variabile di cui si vuole osservare la variazione nel tempo è indicata come il prodotto di componenti considerati come cause della variazione osservata. Perché l'identità sia rispettata è necessario che le componenti siano dei rapporti, dove il denominatore di una componente è anche il numeratore della componente successiva. Questa identità è fornita a priori e dovrà essere realizzata secondo un modello concettuale coerente con i vincoli fisici della variabile studiata, oltre alle considerazioni inerenti la disponibilità dei dati e gli obiettivi dell'analisi.

Questo tipo di analisi ha avuto sviluppo nella letteratura economica con l'obiettivo di studiare l'impatto di variazioni della struttura produttiva sulla domanda energetica dell'industria poiché l'analisi consente di avere una migliore comprensione dei fattori che determinano le variazioni degli usi energetici in un determinato settore. Recentemente questo tipo di analisi è stata estesa anche in campo ambientale, nell'ambito dell'analisi delle emissioni atmosferiche, al fine di comprendere le cause alla base delle variazioni.

In letteratura sono disponibili due principali tecniche di decomposizione: *Structural decomposition analysis* (SDA) e *Index decomposition analysis* (IDA), (Hoekstra, van der Bergh, 2003). Le due metodologie sono state sviluppate indipendentemente e presentano caratteristiche differenti sia in relazione all'ambito di applicazione sia in relazione ai dati di cui necessitano. La principale differenza tra le due tecniche consiste nel modello di dati utilizzato. IDA può essere applicata solo a dati aggregati a livello settoriale in forma vettoriale e consente di valutare solo gli effetti diretti della variazione dei parametri determinanti, mentre SDA consente sia l'utilizzo delle matrici *input-output* e la valutazione degli effetti indiretti sia l'utilizzo dei dati settoriali. IDA è stata applicata alle emissioni di CO₂ da produzione elettrica (Zhang *et al.*, 2012, Malla, 2009). Tra le diverse metodologie IDA disponibili la *Logarithmic mean Divisia index* (LMDI) ha un'ampia applicazione negli studi energetici ed ambientali (Ang, Zhang, 2000).

Ai fini del presente studio il modello di dati aggregati a livello settoriale non consente di stabilire preferenze tra le due metodologie. Tuttavia a fronte di risultati comparabili tra le due metodologie di analisi, la LMDI è un metodo di calcolo meno esigente e di più rapida applicazione. La SDA è stata applicata ai dati aggregati secondo l'approccio presentato da Siebel (2003), che riprende la metodologia proposta da Dietzenbacher e Los (1998), mentre la IDA è stata applicata secondo il modello LMDI proposto da Ang (2005).

3.1 Structural Decomposition Analysis (SDA)

Per spiegare i presupposti analitici della *Structural decomposition analysis* proposta da Dietzenbacher e Los, supponiamo di decomporre la variabile V nelle sue *driving force* sottostanti, ad esempio le componenti A e B :

$$V = A \times B$$

dove il prodotto dei fattori A e B è uguale alla variabile V . Le variabili V , A e B possono essere scalari, vettori e/o matrici. Sia

$$\Delta V = V^t - V^0$$

la variazione nella variabile V nell'intervallo temporale $(0, t)$. La decomposizione della variazione della variabile V può essere derivata come segue:

$$\Delta V = A^t \times B^t - A^0 \times B^0 \quad (1)$$

aggiungendo e sottraendo in (1) l'espressione $A^t \times B^0$ si ottiene:

$$\Delta V = A^t \times B^t - A^0 \times B^0 + A^t \times B^0 - A^t \times B^0 \quad (2)$$

$$= \Delta A \times B^0 + \Delta B \times A^t \quad (2a)$$

mentre, aggiungendo e sottraendo in (1) l'espressione $A^0 \times B^t$ si ottiene:

$$\Delta V = \Delta A \times B^t + \Delta B \times A^0 \quad (2b)$$

Nell'equazione (2b) i pesi sono opposti a quelli nell'equazione (2a): partendo dal tempo 0 si ottiene la prospettiva dell'indice di Laspeyres, mentre partendo dal tempo t si perviene alla prospettiva dell'indice di Paasche. Inoltre, le equazioni (2a) e (2b) sono le uniche decomposizioni complete – senza termini residui – nel caso di due fattori: esistono solo due modalità in cui gli effetti $\Delta A \times B$ e $\Delta B \times A$ possono manifestarsi.

ΔV può essere scritto:

$$\Delta V = \frac{1}{2}(A^t + A^0)\Delta B + \frac{1}{2}(B^t + B^0)\Delta A$$

In questo modo la variazione di V può essere decomposta nella somma delle variazioni dei fattori A e B , dove $\Delta A = A^t - A^0$ e $\Delta B = B^t - B^0$.

In generale, in presenza di n fattori, si avrà:

$$V = F_1 \times F_2 \dots F_n$$

che è possibile decomporre nelle seguenti due decomposizioni polari:

$$\Delta V = \Delta F_1 \times F_2^t \dots F_{n-1}^t \times F_n^t + F_1^0 \times \Delta F_2 \dots F_{n-1}^t \times F_n^t + \\ + F_1^0 \times F_2^0 \dots \Delta F_{n-1} \times F_n^t + F_1^0 \times F_2^0 \times \dots F_{n-1}^0 \times \Delta F_n \quad (3)$$

e, ordinando i fattori secondo la prospettiva temporale opposta, si ottiene:

$$\Delta V = \Delta F_1 \times F_2^0 \dots F_{n-1}^0 \times F_n^0 + F_1^t \times \Delta F_2 \dots F_{n-1}^0 \times F_n^0 + \\ + F_1^t \times F_2^t \dots \Delta F_{n-1} \times F_n^0 + F_1^t \times F_2^t \times \dots F_{n-1}^t \times \Delta F_n \quad (4)$$

Tuttavia, in questo caso le espressioni polari non sono uniche, ma sono solo due fra le decomposizioni possibili. Dietzenbacher e Los (1998) dimostrano che nel caso generale in cui siano presenti n fattori, saranno possibili $n!$ espressioni di decomposizione.

Il problema della mancanza di unicità della soluzione può essere superato in due modi. Dietzenbacher e Los suggeriscono di adottare la media di due forme di decomposizione polare per evitare complessità di calcolo soprattutto in presenza di numerosi fattori; la soluzione scelta in questo lavoro utilizza la media di tutte le forme possibili di decomposizione, così come suggerito da de Haan (2001) e Seibel (2003).

Quest'ultima soluzione, peraltro, supera ogni arbitrarietà derivante dal dover scegliere una delle possibili coppie di forme di decomposizione polare.

Siano a, b, c, d i fattori che contribuiscono alla variazione della variabile V in un intervallo temporale tra 0 ed t , allora la decomposizione può essere rappresentata come segue:

$$\Delta V = \frac{[\Delta a \cdot (b \cdot c \cdot d) + \Delta b \cdot (a \cdot c \cdot d) + \Delta c \cdot (a \cdot b \cdot d) + \Delta d \cdot (a \cdot b \cdot c)]}{n!} \quad (5)$$

Poiché non esiste una sola decomposizione della variazione di ΔE nell'intervallo temporale $(0, t)$, la decomposizione viene effettuata per tutte le $n!$ combinazioni possibili di stati temporali dei fattori invariati. Il risultato della decomposizione sarà la media di tutte le decomposizioni calcolate. Nel presente studio è stato quindi applicato il metodo proposto da Dietzenbacher e Los (1998). Per maggiori dettagli sulla metodologia si rimanda a Seibel, 2003 e APAT, 2007.

3.2 Index Decomposition Analysis (IDA)

La *Index decomposition analysis* ha diversi approcci, di seguito sarà presentata una sintetica descrizione della *Logarithmic mean Divisia index* (LMDI) che risulta tra le metodologie più diffuse in letteratura (Ang, 2005).

Sia V una variabile soggetta a variazione temporale nell'intervallo $(0, t)$. Le variazioni di V da V^0 a V^t siano determinate da n fattori (X_1, X_2, \dots, X_n) . Siano i le sottocategorie che definiscono le variazioni strutturali di V per ogni fattore, in modo che a livello di sottocategoria sia rispettata la relazione:

$$V_i = X_{1,i} \times X_{2,i} \times \dots \times X_{n,i}$$

L'obiettivo è derivare il contributo degli n fattori nella variazione di V che può essere espressa sia in termini additivi, sia in termini moltiplicativi:

$$\Delta V = V^t - V^0 = \Delta V_{X1} + \Delta V_{X2} + \dots + \Delta V_{Xn} \quad \text{forma additiva}$$

$$\Delta V = V^t / V^0 = D_{X1} \times D_{X2} \times \dots \times D_{Xn} \quad \text{forma moltiplicativa}$$

Le formule generali per l'applicazione della LMDI sono le seguenti:

$$\Delta V_{xk} = \sum_i L(V_i^t, V_i^0) \ln \left(\frac{X_{k,i}^t}{X_{k,i}^0} \right)$$

$$D_{xk} = \exp \left(\sum_i \frac{L(V_i^t, V_i^0)}{L(V^t, V^0)} \ln \left(\frac{X_{k,i}^t}{X_{k,i}^0} \right) \right)$$

dove $L(a, b) = (a - b) / (\ln a - \ln b)$ e $L(a, a) = a$

3.3 Analisi della decomposizione applicata alle emissioni atmosferiche

La variazione delle emissioni di gas serra della produzione elettrica del parco termoelettrico nazionale è dovuta a diversi fattori come la tecnologia di generazione elettrica, il combustibile fossile utilizzato, il contributo delle fonti rinnovabili e la domanda elettrica. Al fine di valutare il contributo relativo di tali componenti è stata effettuata una analisi della decomposizione. Tale tecnica trova ampia applicazione nell'analisi dei dati ambientali. L'Istituto di Statistica della Germania ha adottato l'analisi della decomposizione per valutare la variazione delle emissioni di anidride carbonica (Seibel, 2003).

Il punto di partenza dell'analisi di decomposizione è la costruzione di un'identità in cui la variabile esaminata è indicata come prodotto delle componenti considerate cause determinanti (APAT, 2007). Affinché l'identità sia rispettata le componenti devono essere definite come rapporti, dove il denominatore di una componente è il numeratore della componente successiva. L'identità è fornita a priori in relazione ai dati disponibili ed all'obiettivo dell'analisi considerando il modello concettuale che spieghi i fattori che ragionevolmente possono influenzare la variabile considerata. L'identità individuata nel presente studio è la seguente:

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n \frac{CO_{2i}}{E.E.i} \times \frac{E.E.i}{E.E.F} \times \frac{E.E.F}{E.E.T} \times E.E.T$$

CO_{2i} è l'anidride carbonica emessa dalla tipologia di combustibile fossile i ;

$E.E.i$ è l'energia elettrica prodotta dalla tipologia di combustibile fossile i ;

$E.E.F$ è l'energia elettrica prodotta dai combustibili fossili;

$E.E.T$ è l'energia elettrica totale prodotta, comprese le fonti rinnovabili.

Il primo fattore dell'equazione valuta l'effetto tecnologico, in termini di variazione temporale dei fattori di emissione delle diverse tipologie di combustibili fossili; tale variazione è un indicatore dell'incremento di efficienza degli impianti termoelettrici nel processo di trasformazione delle fonti fossili in energia elettrica. In altri termini viene valutato l'effetto della variazione di intensità emissiva nella generazione elettrica. Il secondo fattore prende in considerazione l'effetto della variazione del mix combustibile, ovvero la variazione della frequenza relativa dei diversi combustibili caratterizzati da differenti fattori di emissione. Il terzo fattore valuta l'effetto della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili considerando la variazione del rapporto tra energia elettrica da fonte fossile ed energia elettrica totale. Infine, il quarto fattore considera l'effetto della variazione di energia elettrica totale prodotta.

In base all'equazione riportata l'emissione atmosferica può essere quindi decomposta nei diversi fattori con le due metodologie precedentemente illustrate, valutando l'effetto della variazione di un fattore lasciando invariati gli altri fattori. Nell'analisi di decomposizione effettuata è stato assunto un contributo indipendente dei quattro fattori sulla variazione delle emissioni atmosferiche. L'effetto finale è valutato in termini additivi per i fattori considerati.

3.3.1 Risultati dell'analisi della decomposizione

Considerata la rilevanza della CO₂ tra i gas a effetto serra emessi per la generazione elettrica la seguente analisi è stata effettuata solo sulle emissioni di CO₂.

L'analisi di decomposizione effettuata con la metodologia SDA, consente di caratterizzare il ruolo di diversi fattori nella variazione delle emissioni atmosferiche. I fattori considerati nell'analisi (tecnologia, tipologia di combustibile, fonti rinnovabili, produzione elettrica totale) concorrono alla riduzione delle emissioni atmosferiche laddove l'incremento della produzione elettrica determina un effetto contrario (Figura 3.1).

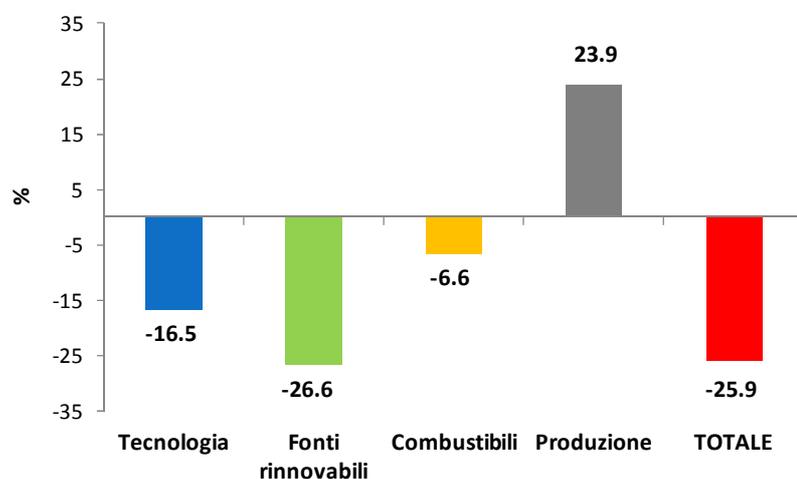


Figura 3.1 – Analisi di decomposizione per fattori delle emissioni atmosferiche di CO₂ nel periodo 1990-2015. E' riportato il contributo alla variazione delle emissioni atmosferiche rispetto al 1990 per i quattro fattori identificati e la variazione totale osservata nello stesso periodo.

I risultati dell'analisi mostrano che i fattori considerati – tecnologico, fonti rinnovabili, combustibile – contribuiscono alla riduzione delle emissioni atmosferiche di CO₂ rispettivamente per il 16,5%, 26,6% e 6,6%, mentre l'incremento della produzione elettrica determina un aumento delle emissioni del 23,9%. L'effetto cumulato dei quattro fattori ha determinato una riduzione delle emissioni atmosferiche nel 2015 del 25,9% rispetto alle emissioni osservate nel 1990. In altre parole la riduzione dovuta alla variazione del fattore tecnologico (diminuzione dei fattori di emissione specifici dei combustibili fossili) nel periodo 1990-

2015 sarebbe stata di 20,8 MtCO₂ qualora gli altri fattori fossero rimasti invariati. La riduzione dovuta alla composizione di combustibili sarebbe stata di 8,3 MtCO₂, mentre l'incremento della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili rispetto al 1990 avrebbe determinato una riduzione delle emissioni di 33,6 MtCO₂. Tali effetti di riduzione delle emissioni sono "compensati" da un aumento netto della produzione di energia elettrica che avrebbe comportato un incremento delle emissioni atmosferiche di 30,1 MtCO₂ in assenza del contributo degli altri fattori. Considerando le singole tipologie di combustibili, la riduzione della quota di prodotti petroliferi rappresenta il maggior contributo alla diminuzione delle emissioni atmosferiche (Tabella 3.1).

Tabella 3.1 – Analisi di decomposizione per fattori delle emissioni atmosferiche. E' riportato il contributo alla variazione delle emissioni atmosferiche nel periodo 1990-2015 per i quattro fattori identificati e la variazione totale osservata nello stesso periodo.

Combustibili	Tecnologia	FER	Combustibili	Produzione elettrica	Totale
Solidi	0,70	-8,21	8,91	7,14	8,54
Gas naturale	-10,04	-8,12	26,56	6,97	15,38
Gas derivati	-0,45	-1,22	-1,97	1,11	-2,53
Prodotti petroliferi	-5,49	-8,56	-43,77	8,20	-49,63
Altri combustibili^[1]	-1,18	-0,53	3,66	0,44	2,39
Totale	-16,47	-26,64	-6,61	23,86	-25,85

^[1] E' esclusa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.

In Figura 3.2 sono riportate le variazioni annuali delle emissioni in termini percentuali dal 1990 al 2015. I dati relativi al fattore tecnologico mostrano che la maggiore riduzione delle emissioni atmosferiche è stata registrata nel periodo dal 2000 al 2001. In questi anni sono entrati in esercizio diversi impianti a ciclo combinato alimentati prevalentemente da gas di sintesi da gassificazione di prodotti petroliferi, mentre negli anni successivi sono entrati in esercizio diversi impianti a ciclo combinato alimentati a gas naturale. Tali impianti sono caratterizzati da maggiore efficienza rispetto ai cicli a vapore tradizionali. Il crescente utilizzo dei gas di sintesi e dei rifiuti solidi urbani a partire dal 2000 spiega inoltre l'incremento delle emissioni dovute alla variazione dei combustibili nel periodo 1999-2001, dovuto in parte anche all'incremento della quota di combustibili solidi nel 2001. Per quel che concerne il contributo della variazione dei combustibili fossili nell'intero periodo esaminato è evidente che la variazione della frequenza relativa dei diversi combustibili, con l'aumento del gas naturale a scapito principalmente dei prodotti petroliferi, determina una corrispondente variazione del contributo emissivo con una diminuzione netta delle emissioni. Di particolare rilievo appare l'andamento del contributo alla riduzione delle emissioni atmosferiche da parte delle fonti rinnovabili. I valori relativi a tale fattore mostrano una oscillazione che riflette la variabilità della produzione elettrica, soprattutto in relazione alla componente idroelettrica che dipende a sua volta dalle condizioni meteorologiche. A partire dal periodo 2007-2008 l'apporto delle fonti rinnovabili assume una dimensione rilevante, con un contributo alla riduzione delle emissioni atmosferiche superiore a quanto registrato per le altre componenti nello stesso periodo. Di particolare interesse appare il risultato della decomposizione tra 2015 e l'anno precedente. Dal 2015 si nota come la variazione delle fonti rinnovabili, nella fattispecie la riduzione del loro contributo, determini un incremento delle emissioni solo parzialmente compensato dagli altri fattori, soprattutto la variazione del mix combustibile.

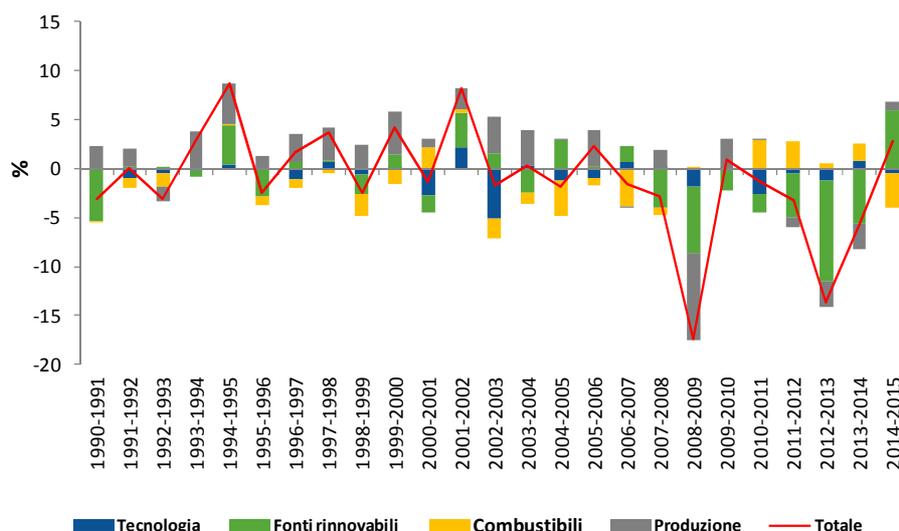


Figura 3.2 - Analisi di decomposizione per fattori delle emissioni atmosferiche per intervalli annuali. Per ogni intervallo annuale sono riportati i contributi alla variazione delle emissioni atmosferiche dei quattro fattori rispetto al 1990, la linea rappresenta la variazione totale osservata.

In relazione al contributo delle fonti rinnovabili alla riduzione delle emissioni atmosferiche è necessario sottolineare che a partire dal 2007 la crisi economica che ha ridotto drasticamente i consumi di combustibili fossili aumentando nel contempo la quota delle fonti rinnovabili dovuto alla priorità di dispacciamento dell'energia elettrica da fonti rinnovabili. In ogni caso ogni unità di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili contribuisce alla riduzione delle emissioni atmosferiche in maniera di gran lunga superiore a qualsiasi altro fattore, nell'ipotesi di sostituzione di una equivalente quantità di energia elettrica prodotta da qualsiasi fonte fossile.

L'applicazione della *Index decomposition analysis* con la metodologia LMDI proposta da Ang (2005) mostra risultati analoghi a quelli della *Structural decomposition analysis* con la metodologia proposta da Dietzenbacher e Los (1998).

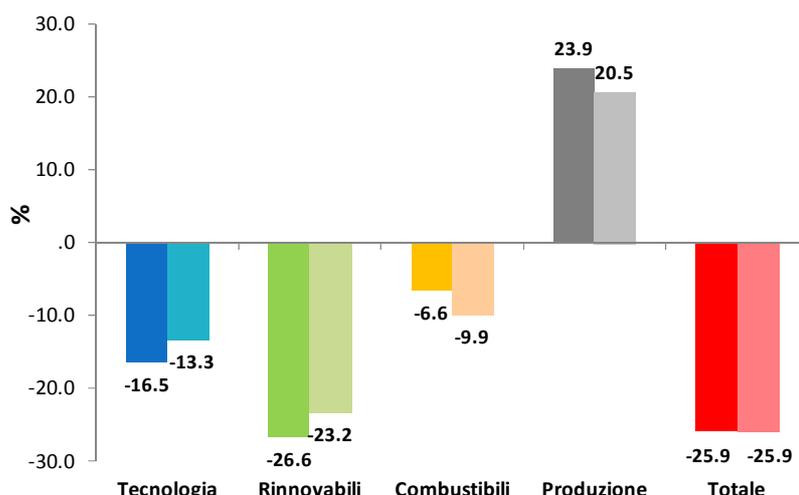


Figura 3.3 – Confronto dei risultati della analisi di decomposizione per fattori delle emissioni atmosferiche nel periodo 1990-2015 con metodologie SDA e IDA, rispettivamente la prima e la seconda barra per ciascun fattore.

Le due metodologie presentano differenti percentuali del contributo di ciascun fattore alla variazione delle emissioni di CO₂ nel periodo esaminato ma mostrano essenzialmente la stessa struttura. La Figura 3.3 mostra

che il contributo della produzione elettrica calcolato con la metodologia LMDI è inferiore a quello calcolato secondo la metodologia SDA, pertanto l'incremento di emissioni di CO₂ dovuto a questo fattore è compensato da un differente contributo dei restanti fattori. Tuttavia è evidente la corrispondenza del contributo relativo dei diversi fattori tra le due modalità di analisi.

Dai risultati osservati si può concludere quindi che la riduzione delle emissioni atmosferiche nel settore elettrico nel periodo 1990-2015 sia prevalentemente dovuta all'incremento della produzione elettrica da fonti rinnovabili e all'incremento dell'efficienza della trasformazione elettrica nel settore termoelettrico. Per quanto riguarda il secondo fattore sono stati determinanti l'entrata in esercizio degli impianti a ciclo combinato alimentati a gas naturale e l'incremento della quota di rifiuti utilizzati per la generazione elettrica. La produzione elettrica da fonti rinnovabili diventa negli ultimi anni il fattore prevalente di riduzione delle emissioni dal settore elettrico, fatto salvo quanto registrato nel 2015.

3.4 Energia elettrica e PIL

La produzione di energia elettrica nazionale e i relativi consumi sono strettamente correlati alle attività economiche del paese. Nel seguente grafico è illustrata la correlazione tra prodotto interno lordo pubblicato periodicamente da ISTAT (valori concatenati con anno di riferimento 2010) e produzione elettrica lorda.

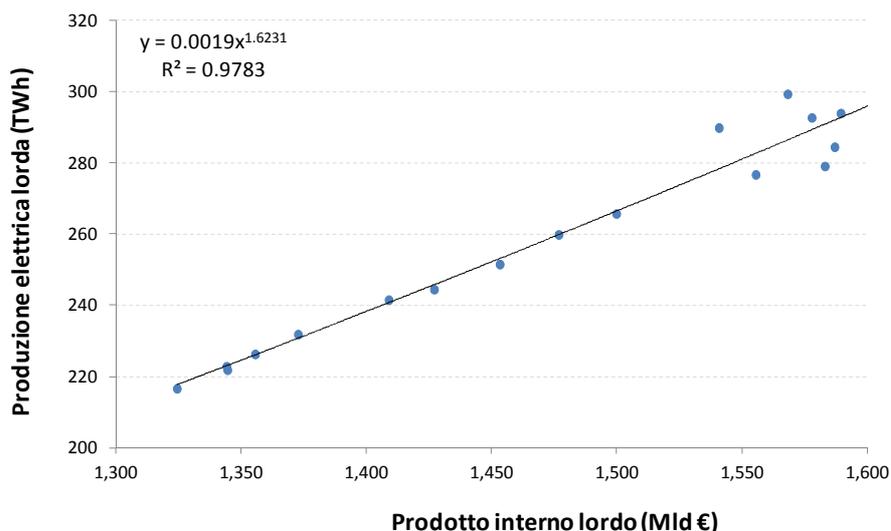


Figura 3.4 – Correlazione tra Prodotto interno lordo (valori concatenati - anno 2010) e produzione elettrica lorda nazionale.

Con alti valori del PIL la correlazione diviene non lineare e mostra un disaccoppiamento tra le due variabili, reso più evidente nel successivo grafico. Il tasso di variazione della produzione elettrica e, in pari misura, il tasso di variazione dei consumi elettrici rispetto all'anno 1990 mostrano una velocità maggiore rispetto al tasso di variazione del prodotto interno lordo (Figura 3.5). E' inoltre evidente il disaccoppiamento tra prodotto interno lordo ed emissioni di CO₂ da produzione elettrica, dovuto sia all'incremento di efficienza del sistema elettrico sia alla crescente quota di energia elettrica da fonti rinnovabili. Il disaccoppiamento è particolarmente accentuato negli ultimi anni con il sensibile incremento della quota di energia elettrica da fonti rinnovabili.

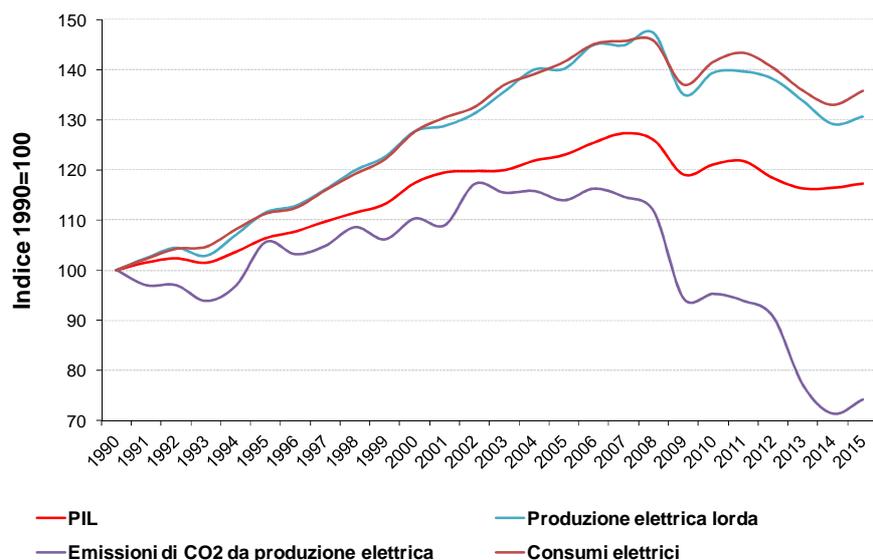


Figura 3.5 – Andamento del prodotto interno lordo, della produzione elettrica lorda, dei consumi elettrici e delle emissioni di CO₂ da produzione elettrica rispetto all’anno 1990 (1990 = 100).

Il disaccoppiamento tra produzione elettrica (o consumi elettrici) e prodotto interno lordo è dovuto all’incremento dei consumi di energia elettrica nel settore domestico, non associato alla produzione economica, e a un forte tasso di crescita dei consumi nel settore terziario, attenuatosi solo negli ultimi anni e caratterizzato da tassi di crescita del valore aggiunto e del consumo di energia elettrica nettamente divergenti (Figura 3.6). Il settore industria, d’altra parte, mostra un andamento parallelo dei tassi di crescita del valore aggiunto e del consumo di energia elettrica e un indice di intensità energetica pressoché costante.

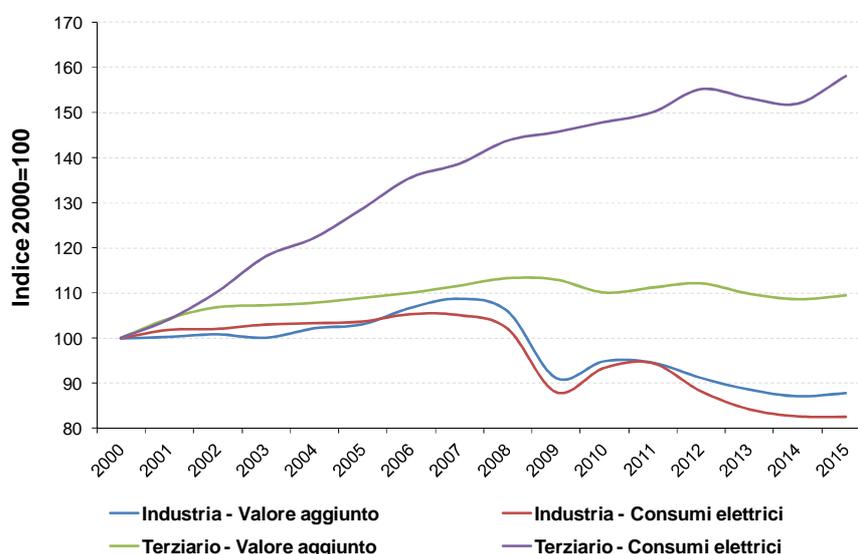


Figura 3.6 – Andamento del valore aggiunto settoriale e dei consumi elettrici rispetto all’anno 2000 nei settori Industria e Terziario (2000 = 100).

L’intensità energetica (consumi di energia elettrica / valore aggiunto con valori concatenati con anno di riferimento 2010) per i settori terziario e industria mostra andamenti opposti. Nel settore terziario il valore passa da 68 Wh/€ a 98 Wh/€ dal 2000 al 2015. Il settore industria, d’altra parte, è caratterizzato da intensità energetica più elevata rispetto al settore dei servizi e un andamento in diminuzione, ossia da una riduzione dei consumi elettrico del settore per unità di valore aggiunto (Tabella 3.2).

Tabella 3.2 – Intensità elettrica per valore aggiunto (valori concatenati con anno di riferimento 2010).

Settore	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	Wh / €							
Agricoltura	163	188	197	204	210	198	192	196
Industria	400	402	394	399	387	380	379	376
Terziario	68	80	91	92	94	95	95	98

In sintesi, con la crisi economica si osserva dal 2008 una forte contrazione dei consumi elettrici soprattutto nel settore dell'industria, mentre nel settore domestico si osservano oscillazioni dei consumi elettrici con cenni di ripresa. Il settore terziario mostra invece un andamento crescente dei consumi elettrici nonostante la contrazione del valore aggiunto. Nel 2015 i settori agricoltura, terziario e domestico mostrano una lieve ripresa dei consumi rispetto all'anno precedente, mentre per l'industria si osserva un lieve calo dei consumi (Tabella 3.3).

Tabella 3.3 – Consumi di energia elettrica per settore.

Settore	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	GWh							
Agricoltura	4.907	5.364	5.610	5.907	5.924	5.677	5.372	5.690
Industria	148.192	153.727	138.439	140.040	130.801	124.871	122.505	122.362
Terziario	65.109	83.793	96.285	97.705	101.038	99.757	98.951	102.941
Domestico	61.112	66.933	69.551	70.140	69.457	66.983	64.255	66.187
Totale	279.320	309.817	309.885	313.792	307.220	297.288	291.084	297.180

3.5 Analisi della decomposizione delle emissioni atmosferiche da consumi elettrici

Una ulteriore analisi della decomposizione è stata effettuata per analizzare il contributo dei settori produttivi alla variazione delle emissioni di CO₂ dal 2000 al 2015 utilizzando la metodologia LMDI. A tale scopo sono considerati i settori industria, terziario e agricoltura con i relativi valori aggiunti (valori concatenati con anno di riferimento 2010) e la CO₂ emessa in relazione all'energia elettrica consumata come il risultato della seguente equazione:

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i}{VA_i} \times \frac{CO_{2i}}{CE_i} \times \frac{VA_i}{PIL} \times PIL$$

- CE_i è il consumo elettrico del settore i (industria, terziario e agricoltura);
- CO_{2i} è l'emissione atmosferica di anidride carbonica in seguito al consumo elettrico nel settore i ;
- VA_i è il valore aggiunto del settore i ;
- PIL è il prodotto interno lordo.

Il primo fattore è indicativo dell'efficienza dei consumi elettrici (Consumi/Valore Aggiunto), il secondo dell'intensità emissiva dell'elettricità consumata (CO₂/Consumi), il terzo della struttura produttiva (Valore Aggiunto/PIL) e il quarto fattore rappresenta la crescita economica (PIL) dovuta all'apporto dei tre settori produttivi.

Si consideri che la valutazione del secondo fattore risente di una forte approssimazione dovuta all'impossibilità di determinare un fattore emissivo dei consumi elettrici per i singoli settori. I fattori di

emissione dei tre settori saranno quindi simili nello stesso anno, pertanto è possibile valutare la variazione dell'intensità emissiva in un periodo ma non le differenze tra i settori.

I risultati dell'analisi della decomposizione, illustrati nella Figura 3.7, mettono in evidenza come, in termini generali, la variazione del PIL nel periodo 2000-2015 sia stata affiancata da un peggioramento dell'efficienza dei consumi elettrici come mostra l'incremento del rapporto tra consumi elettrici e valore aggiunto per tutti i settori eccetto l'industria, da una riduzione dell'intensità emissiva per tutti i settori e da una variazione della struttura produttiva in cui l'industria subisce un drastico ridimensionamento cui corrisponde uno sviluppo del settore terziario. L'efficienza dei consumi determina un incremento delle emissioni atmosferiche di CO₂ pari all'8,2% superato dalla riduzione del 37,5% dovuta all'intensità emissiva e del 6,5% dovuta alla variazione della struttura produttiva. La crescita economica determina un incremento delle emissioni del 2,7%. L'effetto cumulato dei quattro fattori ha determinato una riduzione delle emissioni atmosferiche nel periodo esaminato del 33,1%.

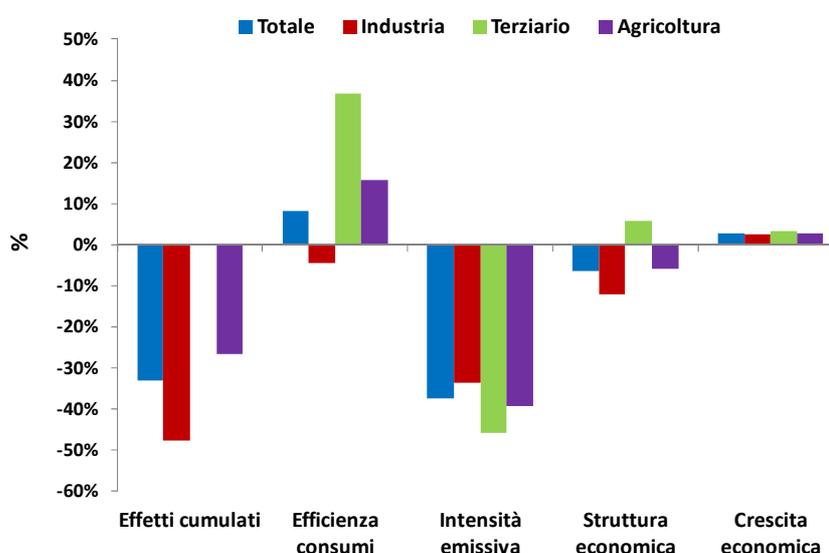


Figura 3.7 – Analisi di decomposizione per fattori delle emissioni atmosferiche da consumo elettrico nei settori produttivi nel periodo 2000-2015. E' riportato il contributo alla variazione delle emissioni atmosferiche per i quattro fattori identificati e la variazione totale osservata nello stesso periodo.

Uno schema piuttosto eterogeneo emerge considerando il contributo di ciascun settore (Tabella 3.4). L'industria mostra uno schema coerente con quello generale, con l'efficienza dei consumi, l'intensità emissiva e il contributo alla struttura produttiva che determinano una riduzione delle emissioni atmosferiche da consumi elettrici, in particolare la struttura economica rappresenta il contributo del settore industria al PIL e risente della crisi che dal 2008 ha contratto in maniera drammatica l'attività del settore (Figura 3.8).

Tabella 3.4 – Analisi di decomposizione per fattori delle emissioni atmosferiche da consumo elettrico nei settori produttivi. E' riportato il contributo alla variazione di emissioni atmosferiche nel periodo 2000-2015 per i fattori identificati e la variazione totale osservata nello stesso periodo.

Settore	Effetti cumulati	Efficienza consumi	Intensità emissiva	Struttura economica	Crescita economica
Industria	-47,8%	-4,5%	-33,7%	-12,0%	2,4%
Terziario	-0,1%	36,7%	-45,9%	5,9%	3,2%
Agricoltura	-26,7%	15,7%	-39,4%	-5,8%	2,8%
Totale	-33,1%	8,2%	-37,5%	-6,5%	2,7%

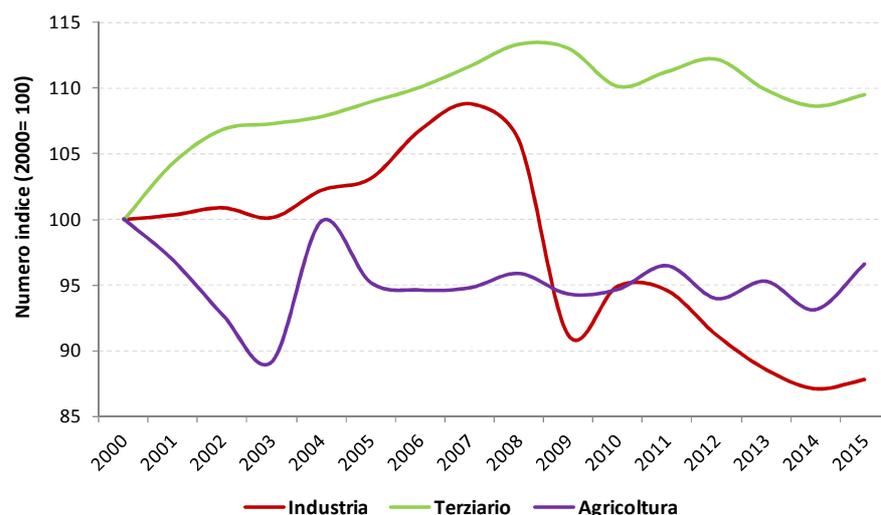


Figura 3.8 – Variazione annuale del valore aggiunto a valori concatenati con anno di riferimento 2010 per i settori industria, terziario e agricoltura (2000=100).

Il contributo alla riduzione delle emissioni atmosferiche dovuto all'efficienza dei consumi elettrici nel settore industriale è piuttosto consistente. E' ragionevole pensare che tale andamento corrisponda a un processo strutturale di aumento dell'efficienza dei consumi elettrici e non risenta della contingente contrazione dei consumi dovuta alla crisi economica poiché i termini costitutivi dell'indicatore (Consumi elettrici / Valore aggiunto) covariano e sono quindi entrambi influenzati dalla crisi economica (Figura 3.9). E' tuttavia utile considerare che la crisi economica ha coinvolto in maniera differente i vari settori industriali, caratterizzati da differente efficienza dei consumi elettrici. Nel settore industria diminuiscono i consumi elettrici del comparto manifatturiero di base (siderurgica, chimica, cartaria, ecc.), maggiormente energivori, la cui quota relativa passa dal 49% del 2000 al 46,2% del 2007 e 42,7% del 2015. La quota di consumi del comparto energia e acqua passa da 7,9% a 12,9% dal 2000 al 2015. La quota dei consumi elettrici del comparto manifatturiero non di base (alimentare, meccanica, mezzi di trasporto, ecc.) nel periodo 2000-2015 rimane piuttosto costante con modeste oscillazioni intorno al valore medio del 42,2%. In maniera simile non si osservano variazioni di rilievo per la quota dei consumi nel comparto delle costruzioni che nel periodo 2000-2015 oscillano intorno alla media del 1,1%.

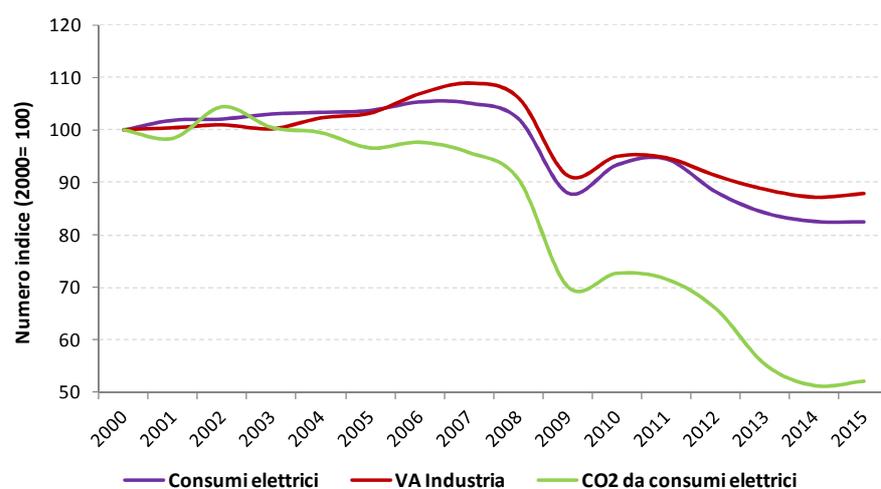


Figura 3.9 – Variazione annuale dei consumi elettrici dell'industria e del valore aggiunto in prezzi concatenati con anno di riferimento 2010. E' inoltre riportato l'andamento delle emissioni di CO₂ da consumo di energia elettrica (2000=100).

In Figura 3.10 è riportata la serie storica del rapporto tra consumi elettrici nel settore industria e valore aggiunto. Dal 2000 al 2003 si osserva un incremento dei consumi per unità di valore aggiunto, seguito da una diminuzione dell'indicatore fino al 2007. Nel periodo della crisi economica i cui effetti perdurano fino al 2015 si osserva una notevole oscillazione dell'indicatore con una impennata seguita da un miglioramento dell'efficienza degli ultimi anni.

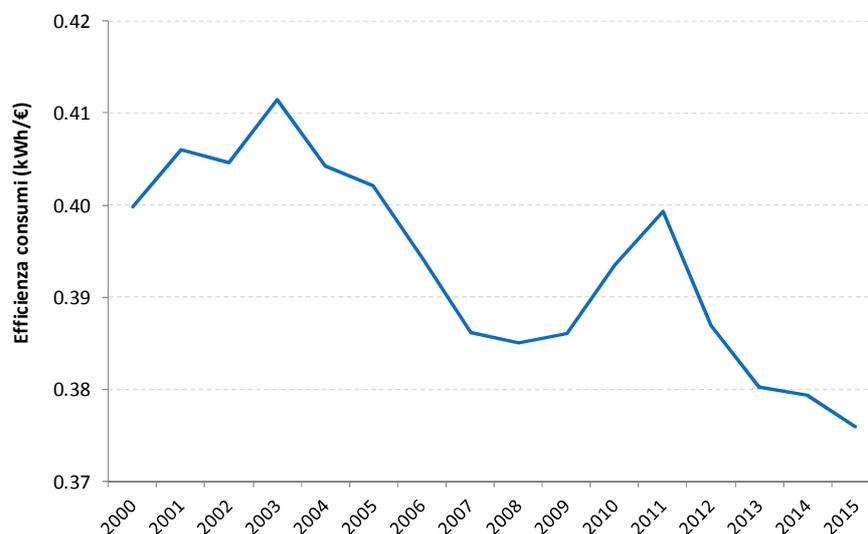


Figura 3.10 – Andamento del rapporto tra consumi elettrici nel settore industria e valore aggiunto (ai prezzi concatenati al 2010).

Nella figura successiva sono illustrate le efficienze per i tre comparti del settore industriale: manifatturiero, costruzioni, energia e acqua. Ad eccezione di una lieve oscillazione dal 2008 al 2010, il comparto manifatturiero mostra una costante diminuzione dei consumi elettrici per unità di valore aggiunto dal 2003, mentre i restanti comparti mostrano un andamento opposto con un incremento dell'indicatore pressoché costante fino agli anni 2010-2011. Successivamente si osserva una inversione di tendenza che tuttavia ritorna a salire negli ultimi anni.

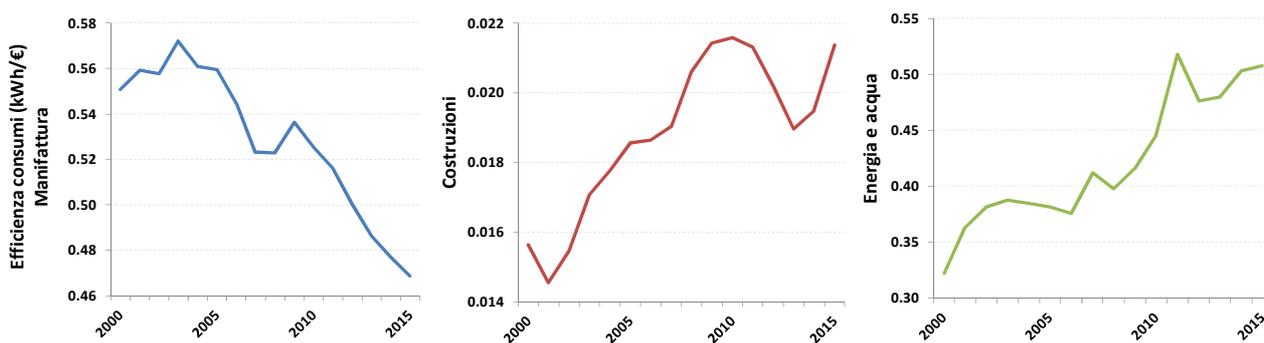


Figura 3.11 – Andamento del rapporto tra consumi elettrici nei tre comparti del settore industria e valore aggiunto (ai prezzi concatenati al 2010).

La serie storica dell'efficienza dei consumi elettrici nel comparto manifatturiero suggerisce un miglioramento strutturale dell'efficienza in termini di consumi elettrici per unità di valore aggiunto. Tuttavia il differente impatto della crisi economica sui diversi comparti ha reso meno evidente il fenomeno a livello dell'intero settore.

La variazione della struttura produttiva, con un minore apporto di valore aggiunto da parte del settore industriale caratterizzato da maggiori emissioni, contribuisce alla riduzione delle emissioni atmosferiche.

Tale riduzione è dovuta sia a dinamiche strutturali quali la terziarizzazione dell'economia ma risente anche della contingente crisi economica che dal 2008 ha investito il settore industriale in misura rilevante.

Il contributo del settore terziario alla variazione delle emissioni atmosferiche mostra uno schema decisamente differente da quello mostrato dal settore industriale. I consumi elettrici per valore aggiunto prodotto mostrano un notevole incremento, il fattore efficienza determina quindi un incremento delle emissioni atmosferiche. Inoltre l'aumento del peso relativo del settore terziario nella struttura produttiva determina un ulteriore contributo positivo alle emissioni atmosferiche. Tali fattori sono più che compensati dalla minore intensità emissiva del settore terziario rispetto agli altri settori produttivi.

Nel settore agricoltura la diminuzione dell'efficienza dei consumi elettrici in rapporto al valore aggiunto, determina un incremento delle emissioni atmosferiche nel periodo 2000-2015, mentre la riduzione della quota di valore aggiunto del settore rispetto al PIL determina una riduzione delle emissioni. L'agricoltura infatti mostra una consistente riduzione del peso relativo nella struttura economica nazionale. L'intensità emissiva del settore determina una riduzione netta delle emissioni.

Per i tre settori economici il fattore dell'intensità emissiva, ovvero la quantità di CO₂ emessa per unità di consumo elettrico, determina una riduzione delle emissioni atmosferiche. L'intensità emissiva dipende essenzialmente dalla diminuzione del fattore di emissione della produzione elettrica i cui fattori determinanti sono stati esaminati nel precedente paragrafo. In sintesi si può affermare che la riduzione delle emissioni atmosferiche di CO₂ per il consumo elettrico nei comparti produttivi tra il 2000 e il 2015 è essenzialmente dovuta ai fenomeni che hanno coinvolto in diversa misura industria e agricoltura, mentre il settore terziario non mostra un contributo netto alla riduzione delle emissioni.

L'analisi della decomposizione discussa in questo paragrafo non considera il consumo elettrico nel settore domestico poiché lo stesso non è connesso all'attività economica e non contribuisce formalmente alla variazione del PIL. Tuttavia dall'andamento delle emissioni atmosferiche da consumo di energia elettrica nel settore residenziale è possibile inferire alcune considerazioni riguardo l'efficienza e l'intensità emissiva. Come illustrato nel seguente grafico dal 2000 al 2008 le emissioni atmosferiche dovute al consumo di elettricità nel settore residenziale sono diminuite solo del 0,7%, mentre dal 2008 si osserva una drastica diminuzione delle emissioni (-31,1% nel 2015 rispetto al 2008). A tale andamento corrisponde un incremento pressoché costante del consumo elettrico interrotto solo dopo il 2011. La covariazione dei due parametri dopo il 2011 è caratterizzata da differenti velocità. Mentre i consumi elettrici si riducono del 5,6% nel periodo 2011-2015, la riduzione osservata per le emissioni atmosferiche è del 21,3%.

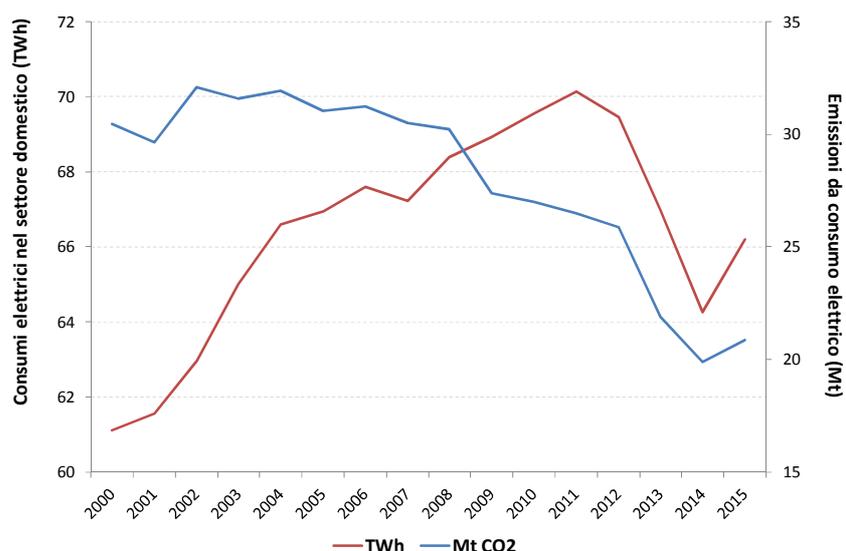


Figura 3.12 – Consumi elettrici e fattore di emissione da consumi elettrici nel settore residenziale.

Le emissioni atmosferiche procapite per consumo di energia elettrica nelle abitazioni mostrano una costante diminuzione dal 2003 al 2014 con una lieve ripresa nel 2015. D'altra parte il consumo procapite di

energia elettrica mostra un rapido incremento fino al 2004, seguito da una fase di stabilità con lieve crescita fino al 2011, seguita da una drastica flessione fino al 2014 e da una ripresa dei consumi nel 2015.

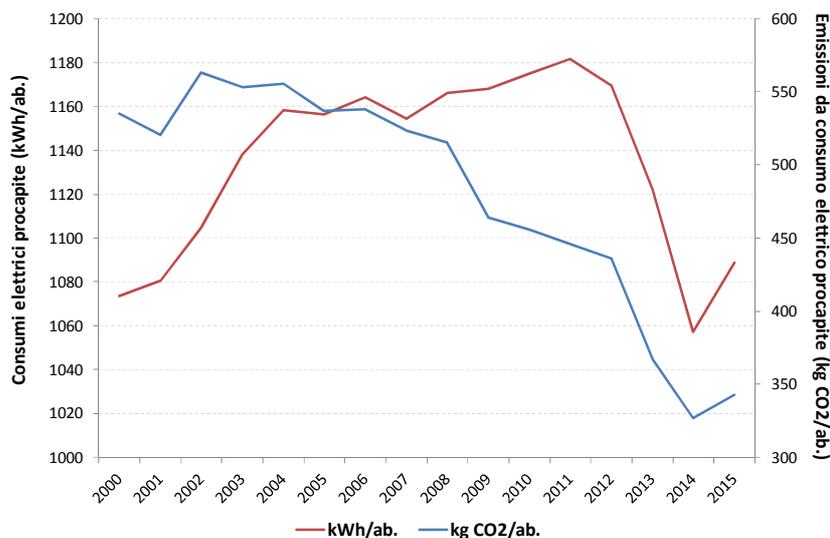


Figura 3.13 – Consumi elettrici procapite e emissioni procapite da consumi elettrici nel settore residenziale.

In base a tali dati è possibile concludere che la riduzione delle emissioni da consumo elettrico nel settore domestico supera l'incremento dei consumi elettrici, come mostra la forte divergenza tra l'andamento dei consumi e delle emissioni nel seguente grafico. Inoltre, l'andamento relativamente piatto dei consumi procapite dal 2004 al 2011 rispetto a quello in lieve crescita dei consumi totali è compatibile con l'ipotesi di un incremento dell'efficienza elettrica. Tra i consumi e consumi procapite si osserva infatti un crescente disaccoppiamento. Negli ultimi anni prevalgono fattori che determinano una forte riduzione dei consumi elettrici procapite con una lieve ripresa nel 2015. E' verosimile quindi che l'aumento di efficienza dei consumi sia affiancato dal risparmio.

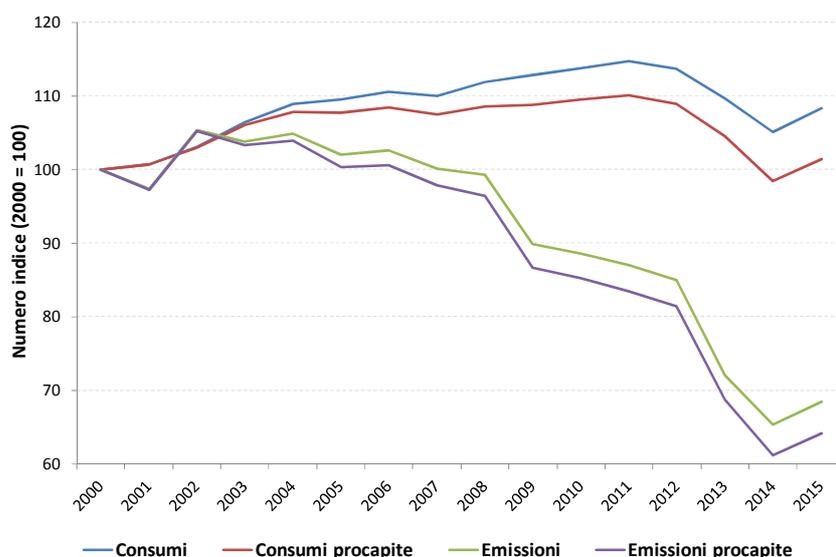


Figura 3.14 – Variazione annuale dei consumi elettrici (totali e procapite) e delle emissioni atmosferiche dovute al consumo elettrico (totali e procapite) nel settore domestico (2000=100).

CONCLUSIONI

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili nel settore elettrico ha subito un rilevante impulso negli ultimi anni nonostante l'arresto dell'andamento positivo osservato nel 2015 e confermato dai dati preliminari per il 2016. La quota di energia elettrica rinnovabile rispetto alla produzione totale lorda è passata dal 15,3% del 2007 al 43,1% del 2014 per scendere nuovamente nel 2015 al 38,5%. Lo sviluppo dell'energia elettrica rinnovabile consegue le politiche di riduzione delle emissioni di gas serra e di incremento delle fonti rinnovabili rispetto ai consumi finali. Tale incremento è stato possibile attraverso diverse misure quali incentivazione delle fonti rinnovabili nel settore elettrico e priorità di dispacciamento dell'energia elettrica da fonti rinnovabili. Pertanto a partire dal 2007 la crisi economica ha ridotto drasticamente i consumi totali aumentando nel contempo la quota delle fonti rinnovabili.

Per quanto riguarda le emissioni atmosferiche del settore elettrico si osserva una rapida diminuzione dei fattori di emissione di CO₂ per la generazione elettrica. I risultati dell'analisi della decomposizione possono essere sintetizzati come segue:

- le emissioni di CO₂ sono diminuite da 126,2 Mt nel 1990 a 93,6 Mt nel 2015, mentre la produzione lorda di energia elettrica è passata nello stesso periodo da 216,6 TWh a 283 TWh; i fattori di emissione di CO₂ per la generazione di energia elettrica mostrano quindi una rapida diminuzione nel periodo 1990-2015. Considerando anche la quota di emissioni dovute alla produzione di calore nel 2015 le emissioni di CO₂ del settore elettrico ammontano a 106,7 Mt;
- nel periodo 1990-2015 le emissioni metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O) rappresentano mediamente lo 0,37% delle emissioni di gas a effetto serra dagli impianti esclusivamente dedicati alla produzione elettrica, esclusi quindi gli auto produttori;
- l'analisi della decomposizione mostra che storicamente l'aumento dell'efficienza tecnologica nel settore termoelettrico e il connesso incremento della quota di gas naturale hanno avuto un ruolo dominante nella diminuzione delle emissioni di CO₂, tuttavia negli ultimi anni il significativo incremento della quota di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili assume un ruolo prevalente rispetto agli altri fattori considerati;
- l'analisi della decomposizione dei consumi elettrici mostra che l'efficienza contribuisce alla riduzione delle emissioni atmosferiche solo nel settore industriale che rivela una struttura piuttosto eterogenea per i diversi comparti, mentre nel settore terziario la diminuzione dei fattori di emissione è compensata dall'incremento dei consumi elettrici. Nel settore domestico si ha un forte disaccoppiamento tra consumi elettrici e corrispondenti emissioni atmosferiche.

I fattori di emissione nel settore della generazione e del consumo di energia elettrica sono indispensabili per la programmazione e il monitoraggio di iniziative volte alla riduzione delle emissioni di gas serra che coinvolgono il settore elettrico, in relazione alle strategie di sviluppo del settore a livello nazionale e alle misure di risparmio energetico che è possibile adottare anche a livello locale. Il potenziale di riduzione delle emissioni di gas serra può essere valutato solo attraverso la conoscenza dei fattori di emissione per la produzione di energia elettrica dalle diverse fonti energetiche e la quantificazione del contributo dei fattori determinanti la variazione delle emissioni atmosferiche.

I fattori di emissione forniti nel presente studio consentono di effettuare una stima delle emissioni di CO₂ evitate in seguito al contributo di diverse componenti e l'analisi della decomposizione fornisce una quantificazione del relativo contributo. In termini pratici, utilizzando i fattori di emissione per i consumi elettrici stimati per il 2015, il risparmio di un kWh a livello di utenza consente di evitare l'emissione in atmosfera di un quantitativo di CO₂ pari al rispettivo fattore di emissione nazionale, ovvero 315 g, mentre la sostituzione di un kWh prodotto da fonti fossili con uno prodotto da fonti rinnovabili consente di evitare l'emissione di 544 g CO₂. Tali dati possono essere utili per valutare, in termini comparativi, le prestazioni di diversi interventi nel settore elettrico.

BIBLIOGRAFIA

- Ang B.W., 2005. *The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide*. Energy Policy 33, 867–871.
- Ang B.W., Zhang F.Q., 2000. *A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies*. Energy 25, 1149–1176.
- APAT, 2007. *Analisi di decomposizione delle emissioni atmosferiche di anidride carbonica e degli acidificanti potenziali applicata ai dati della NAMEA italiana*.
- de Haan M. 2001. *A structural decomposition analysis of pollution in the Netherlands*. Economic Systems Research, 13, 181-196.
- Dietzenbacher E., Los B., 1998. *Structural decomposition techniques: sense and sensitivity*. Economic System Research 10, 307-323.
- EMEP/CORINAIR, 2007. *Emission Inventory Guidebook – 2007*, Technical report No 16/2007.
- ENEL, *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*, vari anni.
- European Commission, 2011. *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COM(2011) 112.
- EUROSTAT, <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- Hoekstra R., van der Bergh J.J.C.J.M., 2003. *Comparing structural and index decomposition analysis*. Energy Economics 25, 39–64.
- IPCC 2006, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC, 2013. *Technical Summary*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISPRA, 2017. *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2015. National Inventory Report 2015 (in preparazione)*.
- ISTAT, *Conti economici nazionali*. <http://dati.istat.it/>
- Malla S., 2009. *CO₂ emissions from electricity generation in seven Asia-Pacific and North American countries: A decomposition analysis*. Energy Policy 37, 1–9.
- Seibel S., 2003. *Decomposition analysis of carbon dioxide-emission changes in Germany - Conceptual frame work and empirical results*. Federal Statistical Office of Germany Environmental Economic accounting division.
- SNAM Rete Gas, *Bilancio di Sostenibilità*, vari anni.
- TERNA, *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*, vari anni.
- TERNA, 2016. *Rapporto mensile sul sistema elettrico*, dicembre 2016.
- Zhang M., Liu X., Wang W., Zhou M., 2012. *Decomposition analysis of CO₂ emissions from electricity generation in China*. Energy policy 52, 159-165.

