

# **SISTEMI ENERGETICI COGENERATIVI**

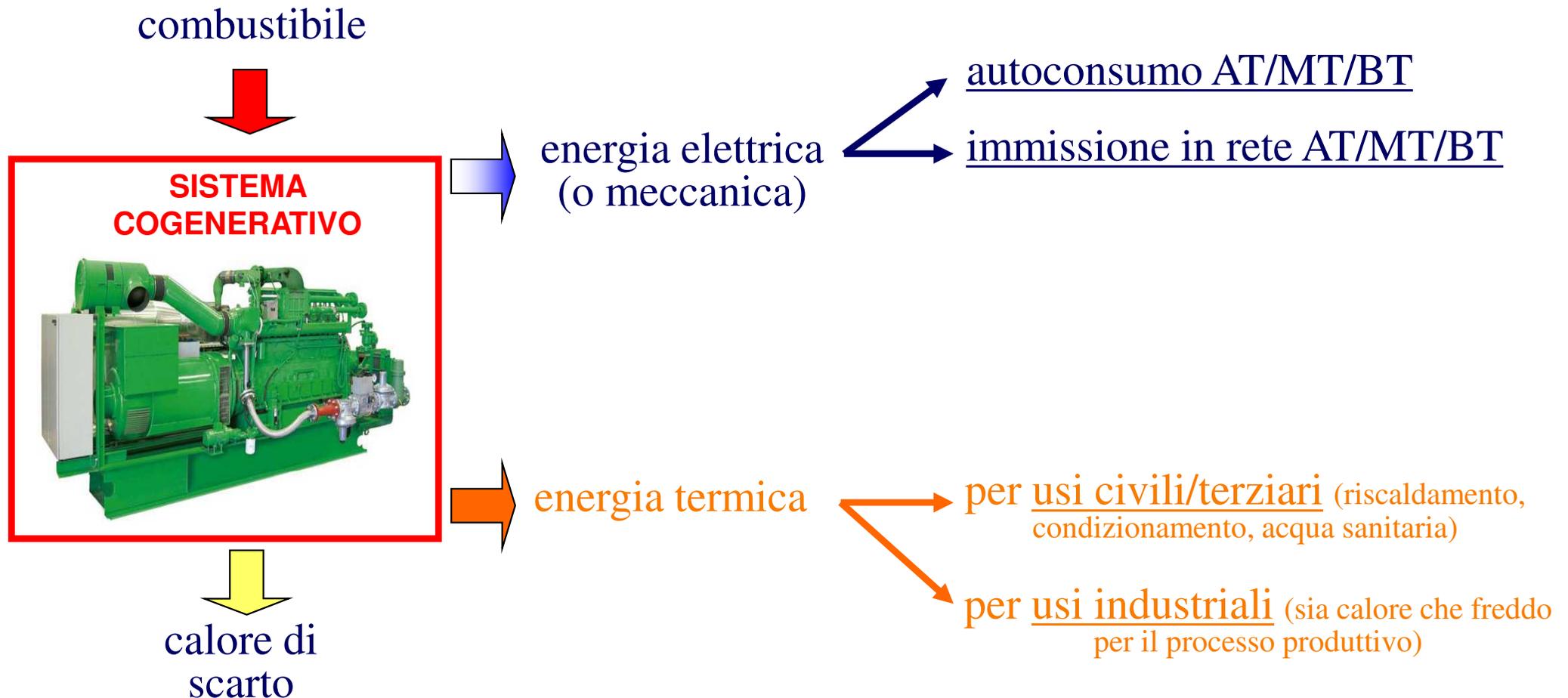
**Aspetti tecnici ed energetici**

**Prof. Pier Ruggero Spina**

**Dipartimento di Ingegneria - Università di Ferrara**

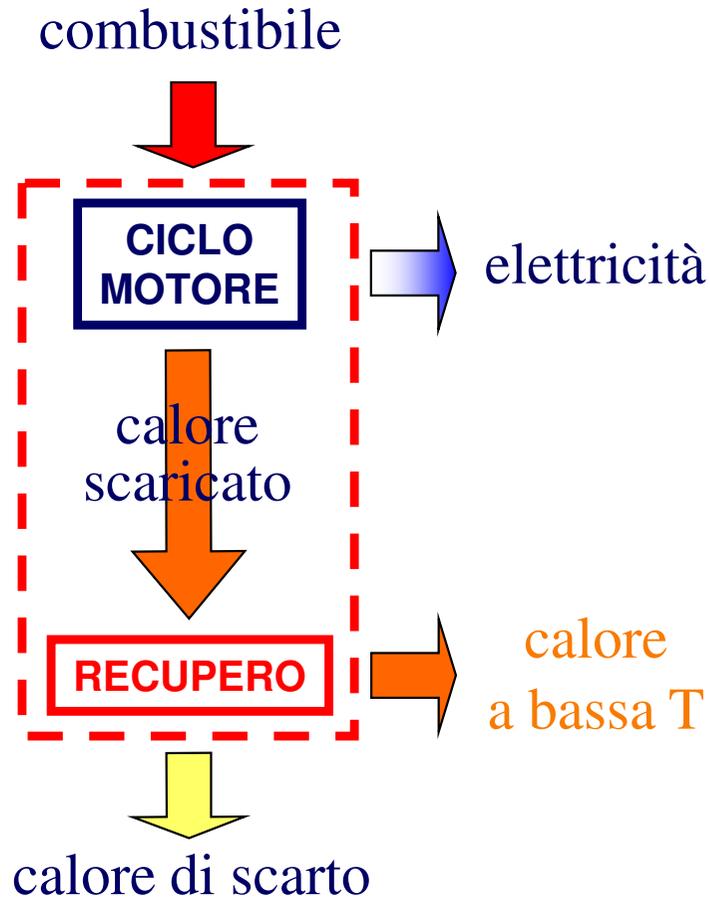
# La cogenerazione

*produzione combinata, in un unico processo, di energia elettrica/meccanica e calore*

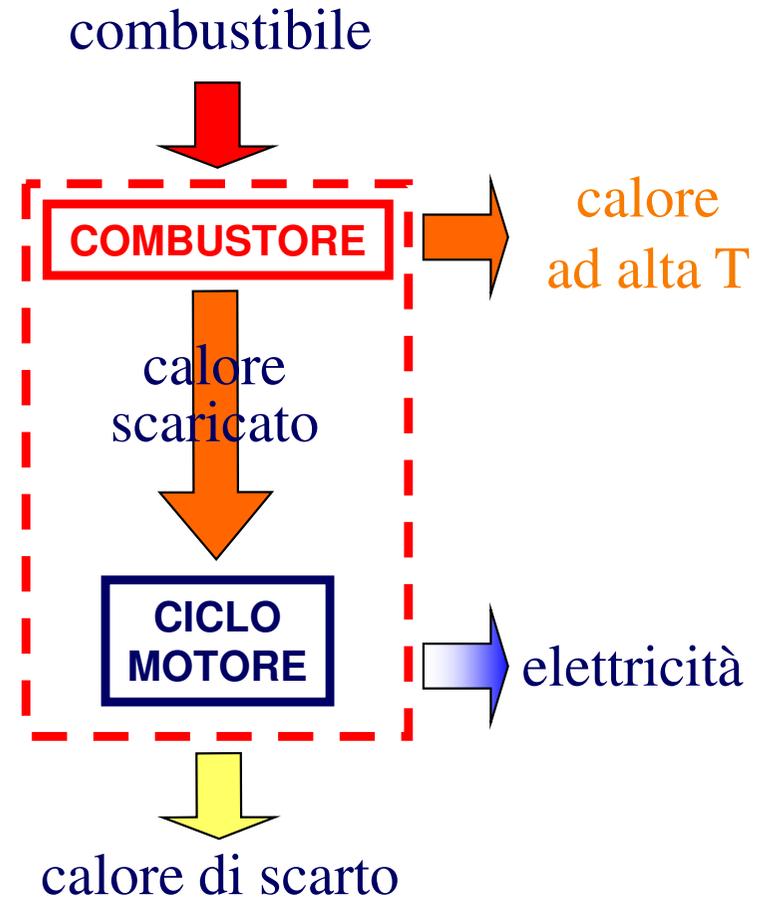


# Cogenerazione “topping” o “bottoming”

## TOPPING

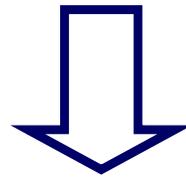


## BOTTOMING



# *Ubicazione del cogeneratore*

- ✓ I combustibili sono una fonte energetica “trasportabile” (anche se in taluni casi questo può risultare economicamente e/o energeticamente non conveniente)
- ✓ L’elettricità è un vettore energetico “trasportabile”
- ✓ Il calore non è trasportabile (se non a brevi distanze)



**IL COGENERATORE DEVE ESSERE UBICATO  
PRESSO L'UTENZA TERMICA**

# *Definizioni di generazione distribuita e di piccola e micro generazione*

*Generazione distribuita (GD)*: insieme degli “impianti di generazione connessi al sistema di distribuzione” (Direttiva 2009/72/CE), indipendentemente dal valore di potenza degli impianti medesimi

# *Definizioni di generazione distribuita e di piccola e micro generazione*

*Generazione distribuita (GD)*: insieme degli “impianti di generazione connessi al sistema di distribuzione” (Direttiva 2009/72/CE), indipendentemente dal valore di potenza degli impianti medesimi

In precedenza l'AEEG, con la Delibera 328/07, aveva definito la *GD*: “insieme degli impianti di generazione di potenza nominale inferiore ai 10 MVA”

# *Definizioni di generazione distribuita e di piccola e micro generazione*

*Generazione distribuita (GD)*: insieme degli “impianti di generazione connessi al sistema di distribuzione” (Direttiva 2009/72/CE), indipendentemente dal valore di potenza degli impianti medesimi

In precedenza l'AEEG, con la Delibera 328/07, aveva definito la *GD*: “insieme degli impianti di generazione di potenza nominale inferiore ai 10 MVA”

“Impianto di piccola/micro generazione un impianto per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione non superiore a 1 MW o a 50 kW” (D.Lgs. n° 20 del 8/2/2007 di recepimento della Direttiva Europea 2004/08/CE)

# *Applicazioni della generazione distribuita*

- ✓ **Generazione continua in parallelo con la rete elettrica nazionale**  
(“*grid connected*”)
- ✓ **Generazione continua “in isola”**
- ✓ **“Stand-by”** per garantire sicurezza nella fornitura elettrica
- ✓ **“Peakshaving”** per far fronte ad elevate richieste di potenza per periodi di tempo limitato
- ✓ **“Power quality”** per garantire tensione e frequenza costante a salvaguardia di un processo produttivo

# *I principali vantaggi*

## **Vantaggi di natura energetica**

- ✓ Impiego razionale dei combustibili fossili
- ✓ Sfruttamento di siti rinnovabili
- ✓ Riduzione delle perdite energetiche nel trasporto

## **Vantaggi di carattere ambientale**

- ✓ Riduzione delle grosse infrastrutture per il trasporto
- ✓ Mitigazione del problema legato all'elettrosmog
- ✓ Rimozione della sindrome *NIMBY*

## **Vantaggi per la sicurezza e la qualità**

- ✓ Riduzione del rischio di black-out
- ✓ Alleggerimento del carico di alcune reti elettriche

## **Vantaggi economici**

- ✓ Risparmi sui costi energetici (acquisto della materia prima “combustibile” invece del prodotto finito “energia elettrica”)

# *Le principali problematiche*

## *Per l'installatore*

- ✓ Iter autorizzativi
- ✓ Aspetti economici (elevato costo specifico delle soluzioni più innovative, scarsa valorizzazione dell'energia elettrica ceduta alla rete, ecc.)
- ✓ Conciliazione della domanda elettrica/termica/frigorifera nel caso di cogenerazione (scelta della taglia e della tipologia di impianto)

## *Per il sistema elettrico e del gas*

- ✓ Impatto sul sistema elettrico (utilizzo delle reti di distribuzione in maniera attiva e non più passiva)
- ✓ Necessità di potenziare reti di distribuzione del gas

## *Per gli enti locali*

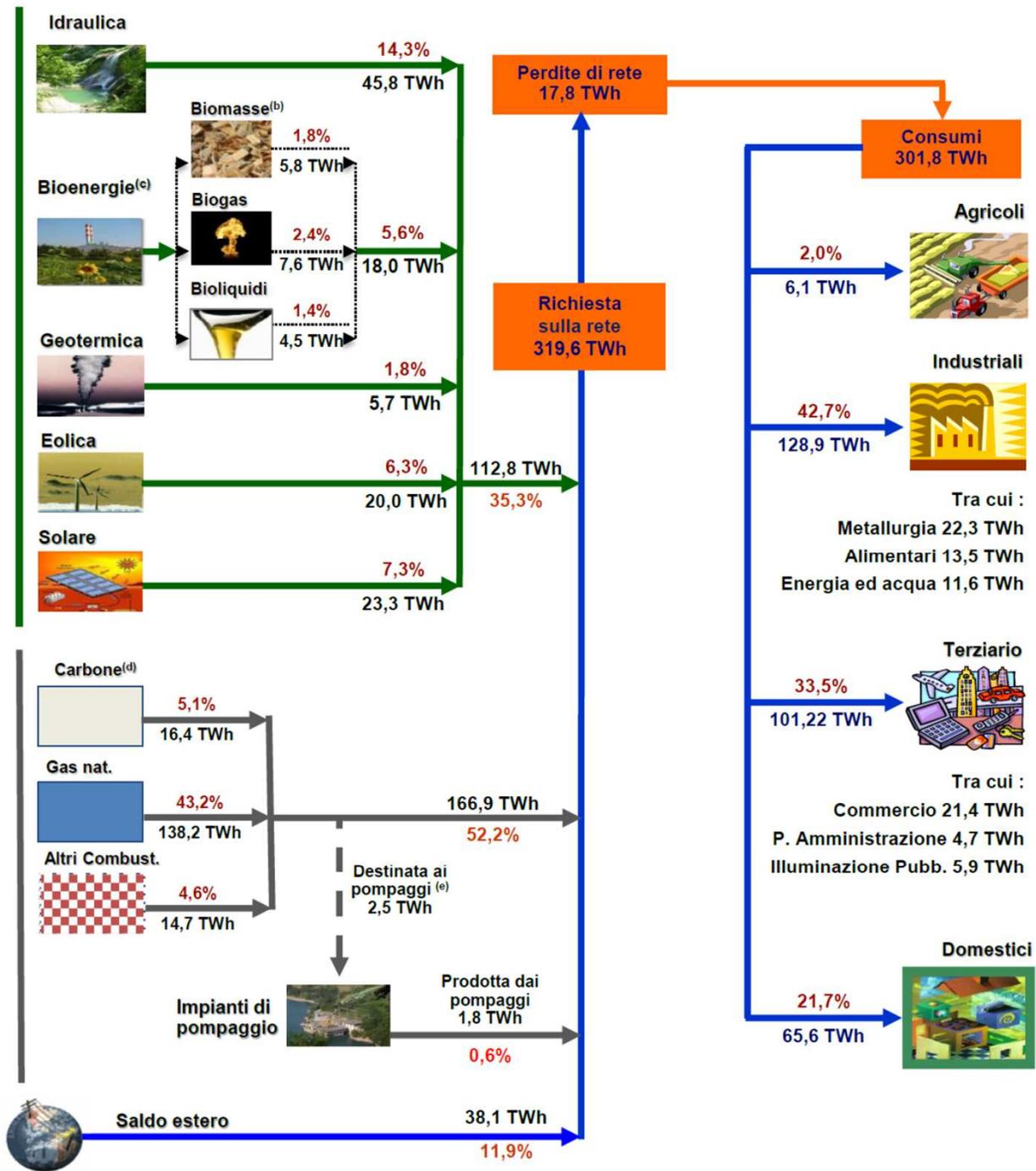
- ✓ Introduzione di nuove sorgenti emissive in aree urbane o comunque densamente popolate

## Produzione netta<sup>(a)</sup> + Saldo estero

## Consumi

R  
i  
n  
n  
o  
v  
a  
b  
i  
l  
i

N  
o  
n  
  
R  
i  
n  
n  
o  
v  
a  
b  
i  
l  
i



# Bilancio elettrico nazionale per il 2019

(Rapporto Statistico anno 2019 - GSE, marzo 2021)

Fonte: elaborazione GSE su dati Terna  
 (a) Produzione netta: è la produzione lorda al netto dei servizi ausiliari  
 (b) Include la parte biodegradabile dei rifiuti  
 (c) Al netto della parte non biodegradabile dei rifiuti solidi urbani, contabilizzati negli altri combustibili  
 (d) Carbone + Lignite  
 (e) L'energia destinata ai pompaggi viene convenzionalmente detratta dalla produzione termica non rinnovabile

GWh	2018	2019	2019/2018
<b>Produzione lorda</b>	<b>289.708,4</b>	<b>293.853,2</b>	<b>1,4%</b>
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%
- termica	192.730,0	195.733,9	1,6%
- geotermica	6.105,4	6.074,9	-0,5%
- eolica	17.716,4	20.202,0	14,0%
- fotovoltaica	22.653,8	23.688,9	4,6%
<b>Consumi dei servizi ausiliari</b>	<b>9.863,8</b>	<b>9.903,1</b>	<b>0,4%</b>
<b>Produzione netta</b>	<b>279.844,6</b>	<b>283.950,1</b>	<b>1,5%</b>
- idrica	49.929,0	47.590,1	-4,7%
- termica	184.336,1	187.317,0	1,6%
- geotermica	5.757,3	5.688,8	-1,2%
- eolica	17.556,8	20.034,4	14,1%
- fotovoltaica	22.265,4	23.319,8	4,7%
<b>Destinata ai pompaggi</b>	<b>2.312,3</b>	<b>2.469,2</b>	<b>6,8%</b>
<b>Produzione destinata al consumo</b>	<b>277.532,3</b>	<b>281.480,8</b>	<b>1,4%</b>
<b>Ricevuta da fornitori esteri</b>	<b>47.170,2</b>	<b>43.974,9</b>	<b>-6,8%</b>
<b>Ceduta a clienti esteri</b>	<b>3.271,4</b>	<b>5.833,7</b>	<b>78,3%</b>
<b>RICHIESTA</b>	<b>321.431,1</b>	<b>319.622,1</b>	<b>-0,6%</b>

## **Bilancio elettrico nazionale anni 2018 e 2019**

*(Dati Statistici Terna anno 2019)*

GWh	2018	2019	2019/2018
-----	------	------	-----------

Produzione lorda	289.708,4	293.853,2	1,4%
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%
- termica	192.730,0	195.733,9	1,6%
- geotermica	6.105,4	6.074,9	-0,5%
- eolica	17.716,4	20.202,0	14,0%
- fotovoltaica	22.653,8	23.688,9	4,6%
Consumi dei servizi ausiliari	9.863,8	9.903,1	0,4%

# Bilancio elettrico nazionale anni 2018 e 2019

(Dati Statistici Terna anno 2019)

Produzione elettrica lorda [TWh]

Produzione netta

- idrica
- termica
- geotermica
- eolica
- fotovoltaica

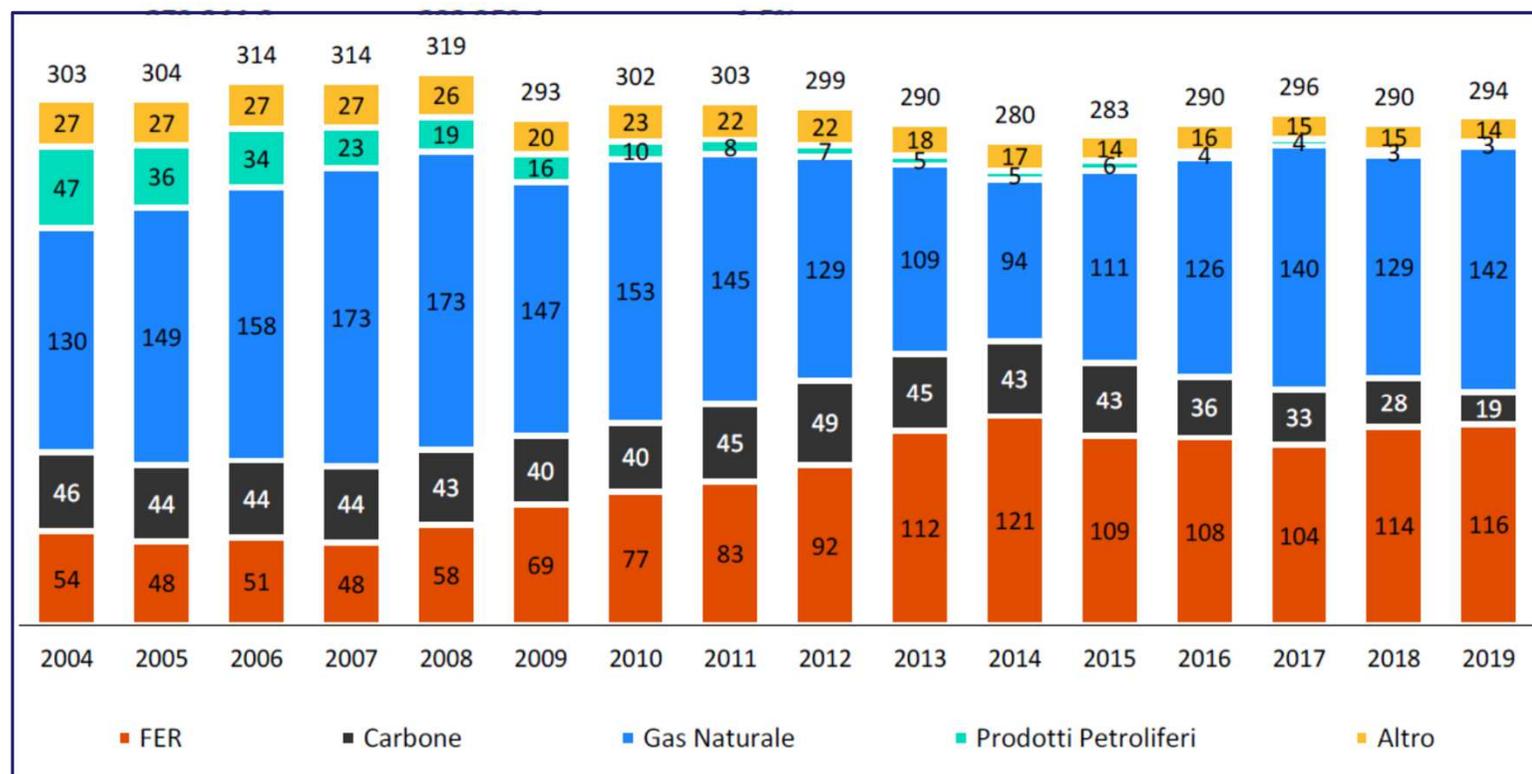
Destinata ai pompaggi

Produzione destinata al consumo

Ricevuta da fornitori esteri

Ceduta a clienti esteri

**RICHIESTA**



GWh	2018	2019	2019/2018
-----	------	------	-----------

Produzione lorda	289.708,4	293.853,2	1,4%
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%
- termica	192.730,0	195.733,9	1,6%
- geotermica	6.105,4	6.074,9	-0,5%
- eolica	17.716,4	20.202,0	14,0%
- fotovoltaica	22.653,8	23.688,9	4,6%
Consumi dei servizi ausiliari	9.863,8	9.903,1	0,4%

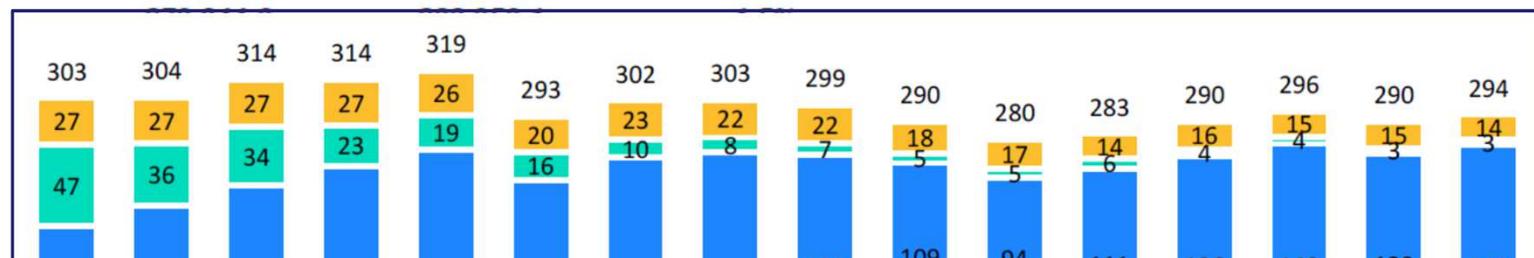
# Bilancio elettrico nazionale anni 2018 e 2019

(Dati Statistici Terna anno 2019)

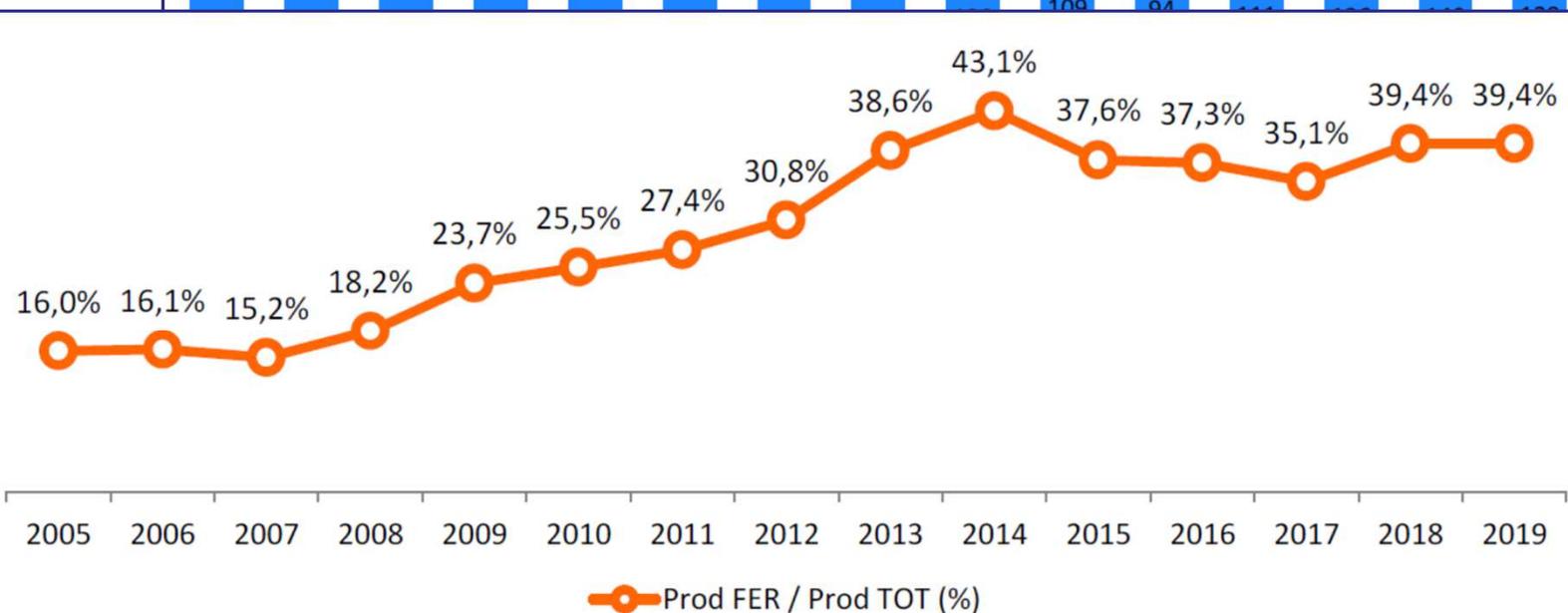
Produzione elettrica lorda [TWh]

## Produzione netta

- idrica
- termica
- geotermica
- eolica
- fotovoltaica

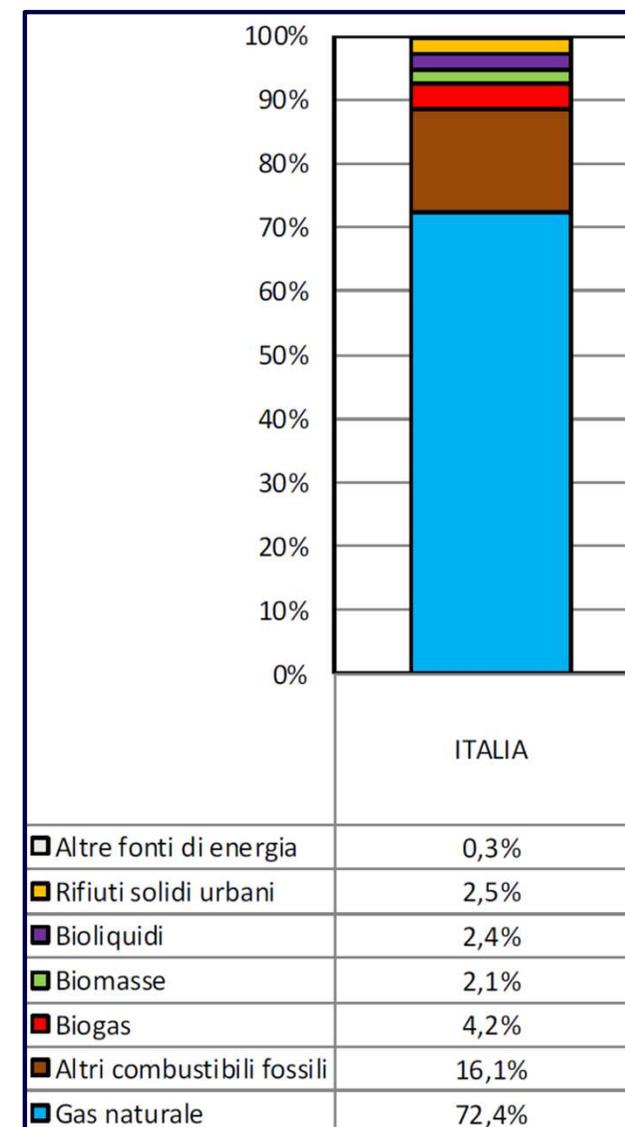


- Destinata ai pompaggi
- Produzione destinata al
- Ricevuta da fornitori est
- Ceduta a clienti esteri
- RICHIESTA**



GWh	2018	2019	2019/2018
<b>Produzione lorda</b>	<b>289.708,4</b>	<b>293.853,2</b>	<b>1,4%</b>
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%
- termica	192.730,0	195.733,9	1,6%
- geotermica	6.105,4	6.074,9	-0,5%
- eolica	17.716,4	20.202,0	14,0%
- fotovoltaica	22.653,8	23.688,9	4,6%
<b>Consumi dei servizi ausiliari</b>	<b>9.863,8</b>	<b>9.903,1</b>	<b>0,4%</b>
<b>Produzione netta</b>	<b>279.844,6</b>	<b>283.950,1</b>	<b>1,5%</b>
- idrica	49.929,0	47.590,1	-4,7%
- termica	184.336,1	187.317,0	1,6%
- geotermica	5.757,3	5.688,8	-1,2%
- eolica	17.556,8	20.034,4	14,1%
- fotovoltaica	22.265,4	23.319,8	4,7%
<b>Destinata ai pompaggi</b>	<b>2.312,3</b>	<b>2.469,2</b>	<b>6,8%</b>
<b>Produzione destinata al consumo</b>	<b>277.532,3</b>	<b>281.480,8</b>	<b>1,4%</b>
<b>Ricevuta da fornitori esteri</b>	<b>47.170,2</b>	<b>43.974,9</b>	<b>-6,8%</b>
<b>Ceduta a clienti esteri</b>	<b>3.271,4</b>	<b>5.833,7</b>	<b>78,3%</b>
<b>RICHIESTA</b>	<b>321.431,1</b>	<b>319.622,1</b>	<b>-0,6%</b>

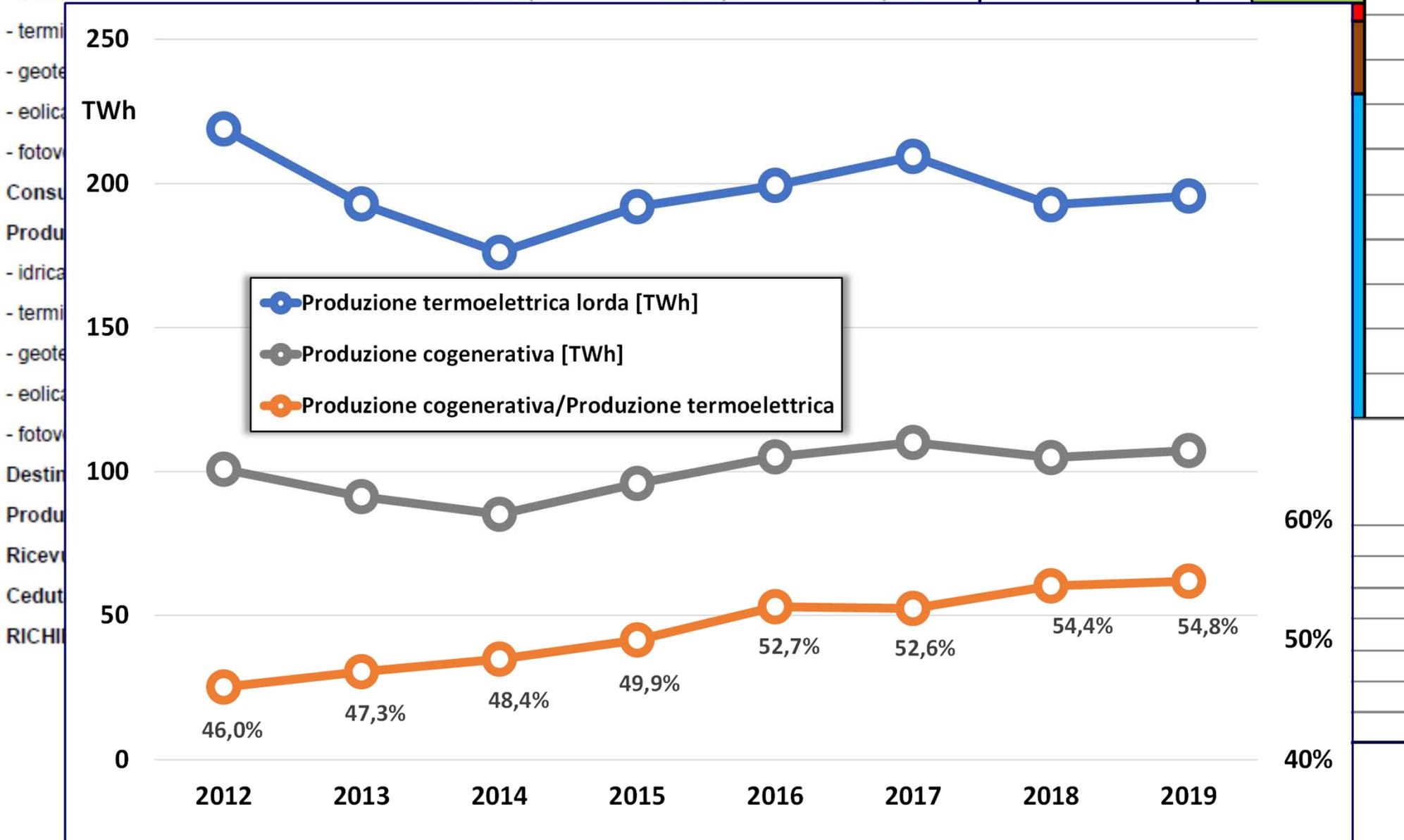
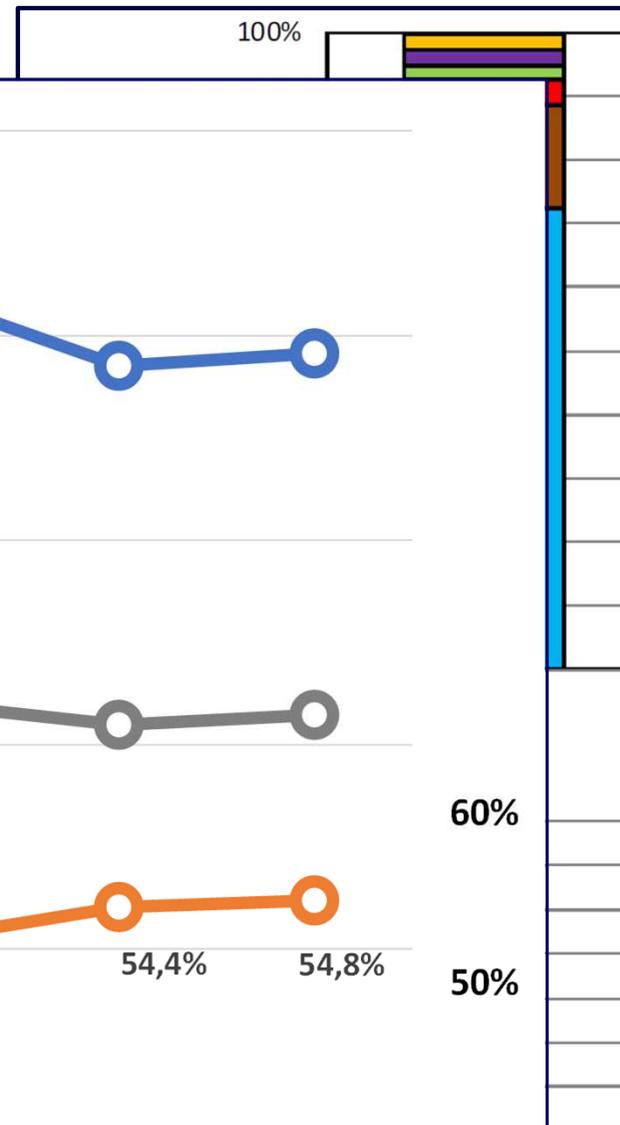
## Produzione termoelettrica lorda anno 2019: 195,7 TWh



GWh 2018 2019 2019/2018

**Produzione termoelettrica  
lorda anno 2019: 195,7 TWh**

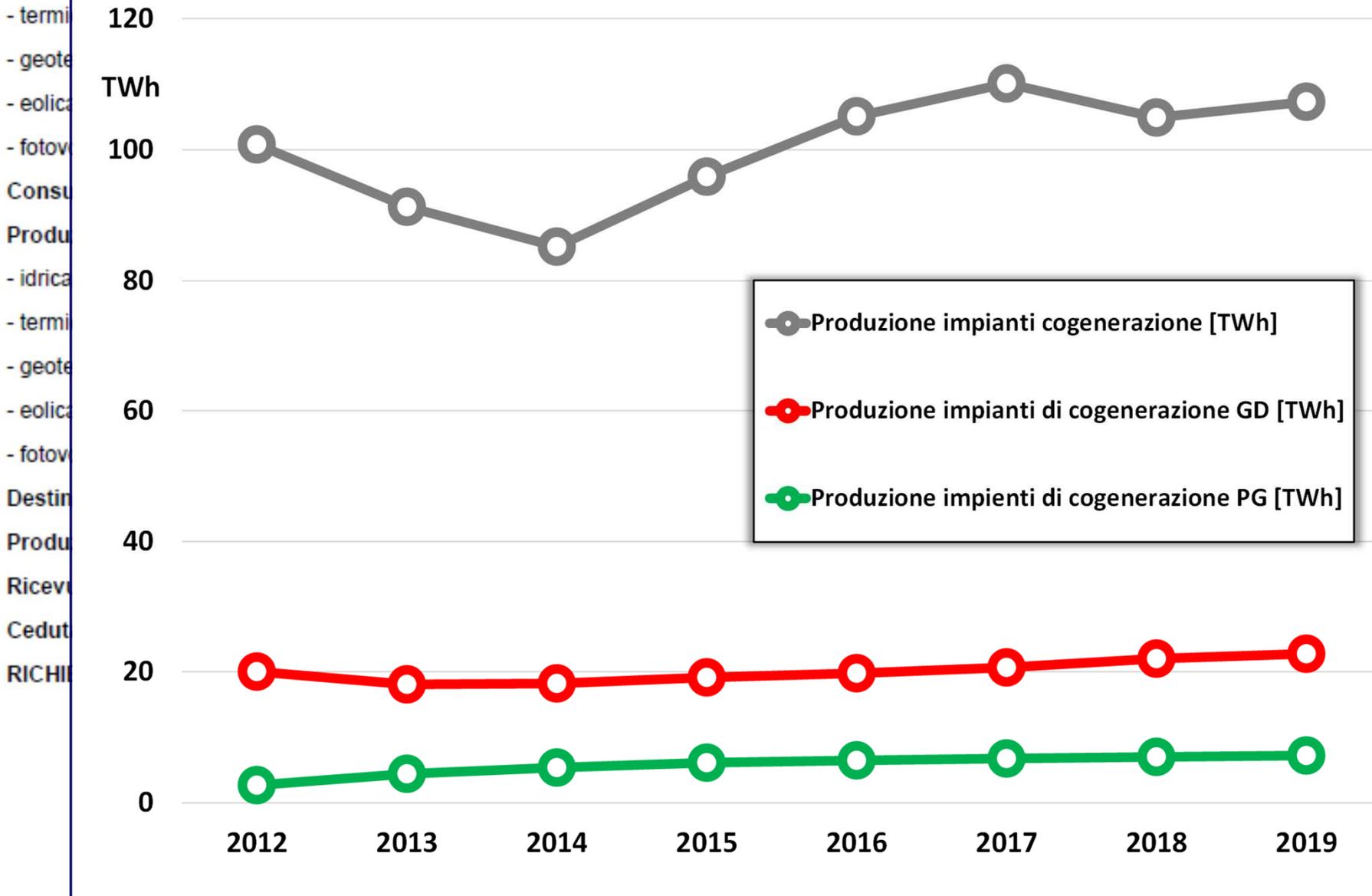
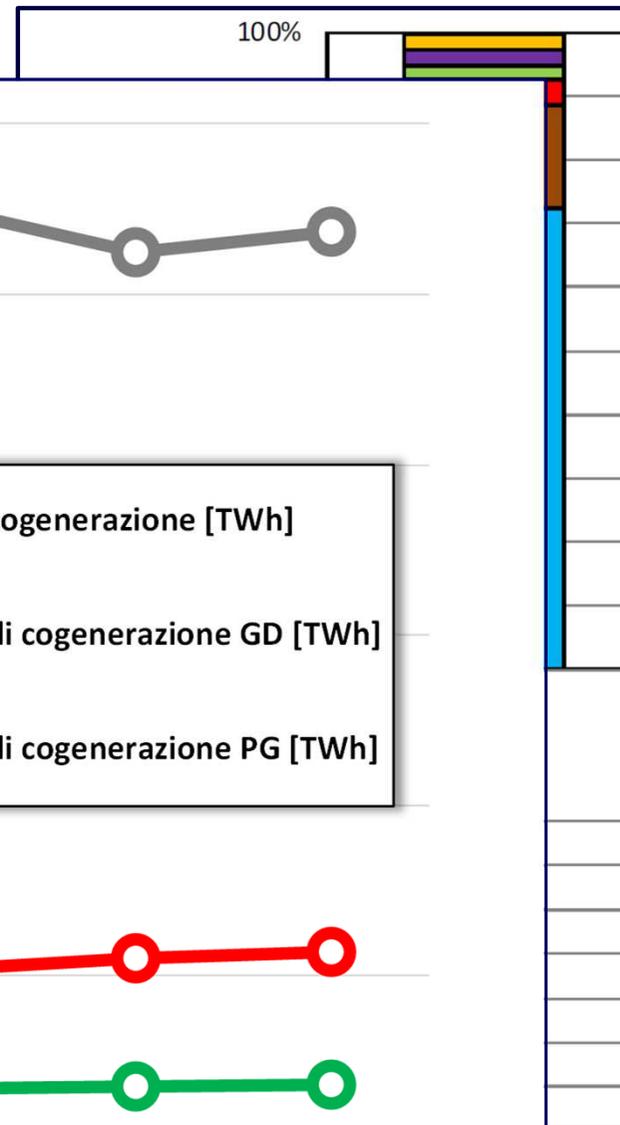
Produzione lorda	289.708,4	293.853,2	1,4%
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%



GWh 2018 2019 2019/2018

Produzione termoelettrica  
lorda anno 2019: 195,7 TWh

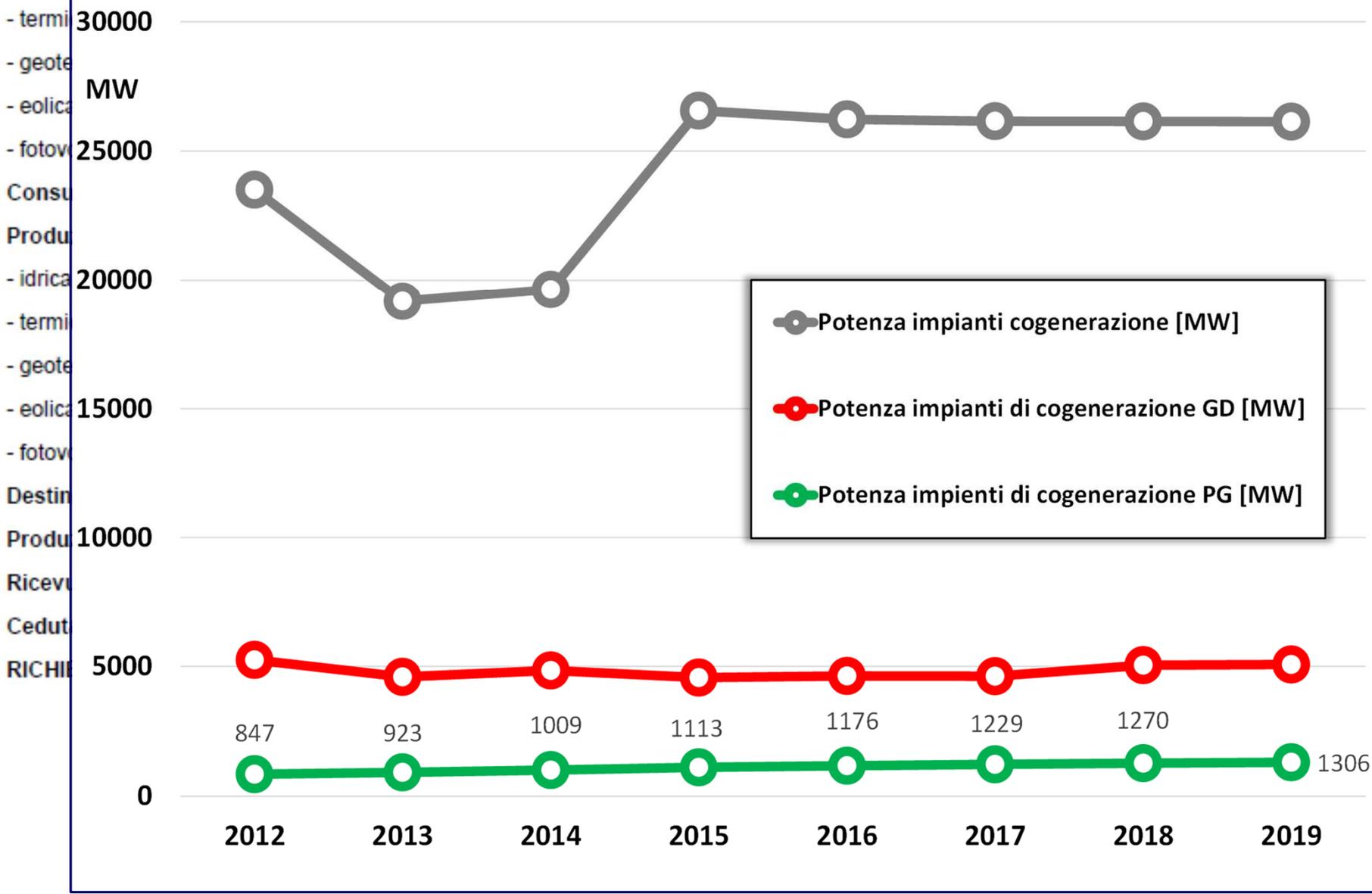
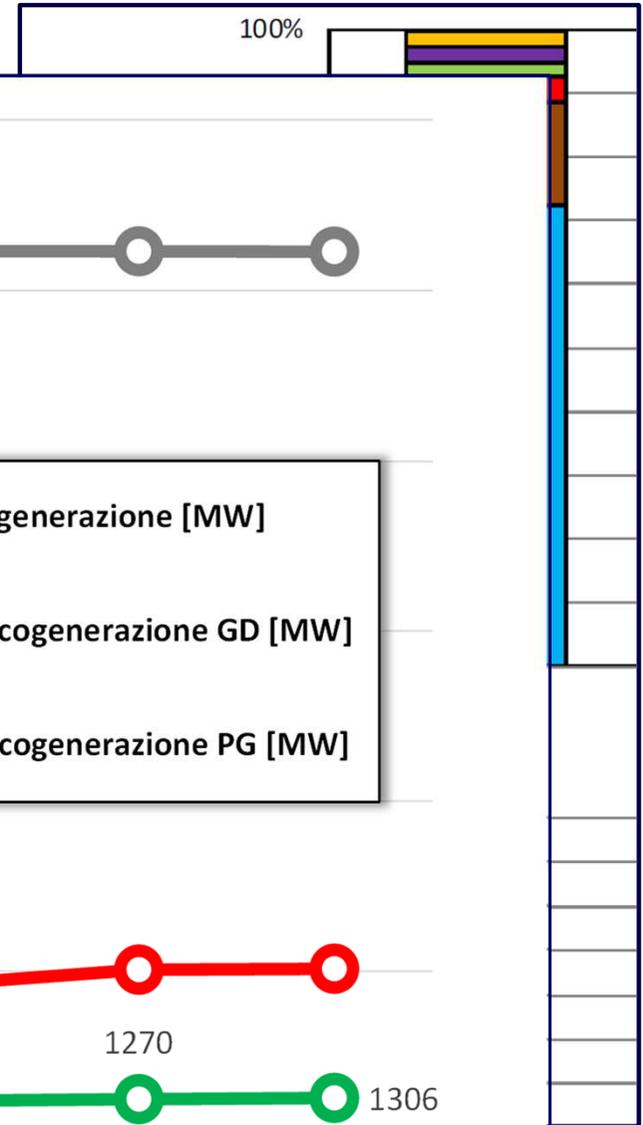
Produzione lorda	289.708,4	293.853,2	1,4%
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%



GWh 2018 2019 2019/2018

**Produzione termoelettrica  
lorda anno 2019: 195,7 TWh**

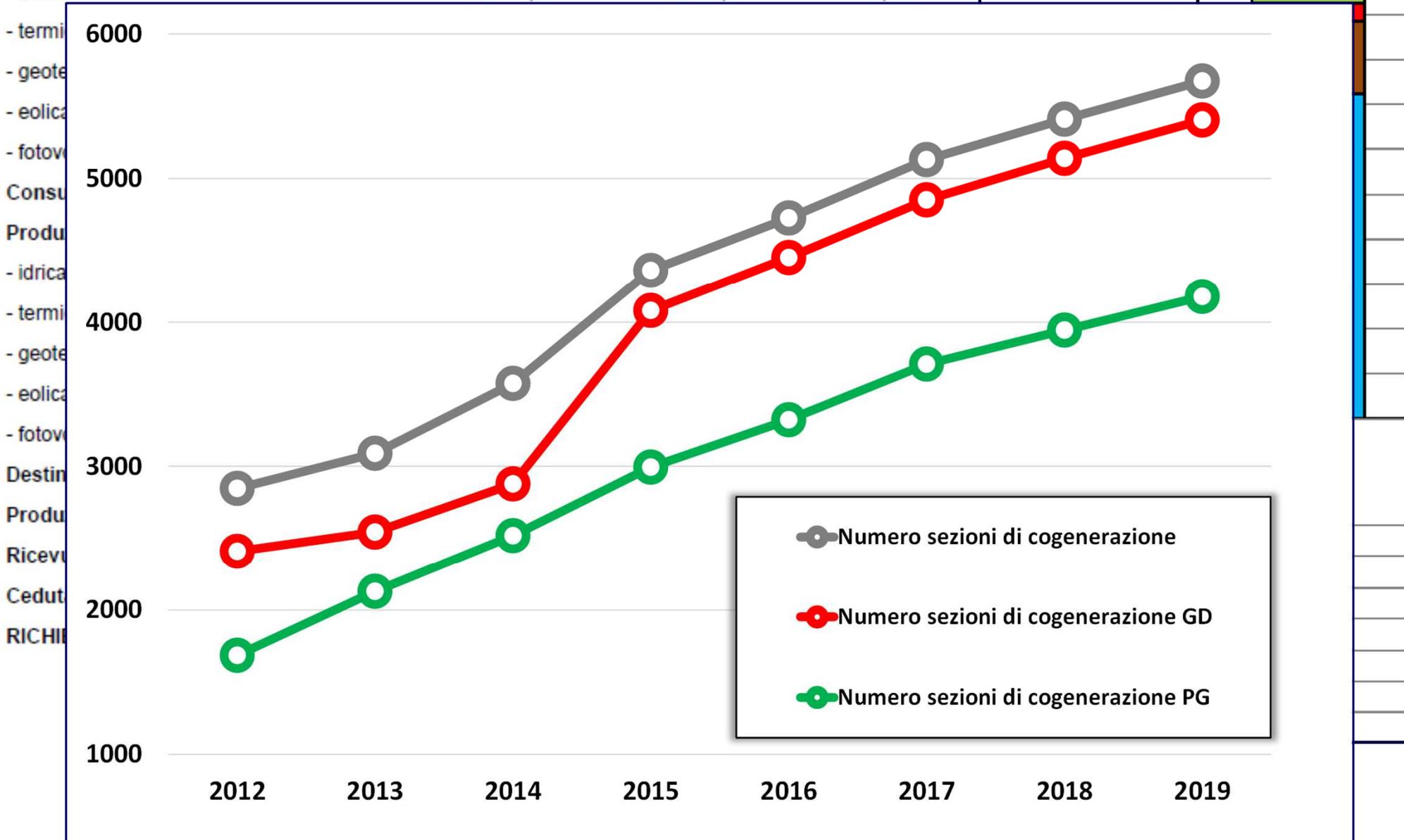
Produzione lorda	289.708,4	293.853,2	1,4%
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%



GWh 2018 2019 2019/2018

Produzione termoelettrica  
lorda anno 2019: 195,7 TWh

Produzione lorda	289.708,4	293.853,2	1,4%
- idrica	50.502,8	48.153,5	-4,7%

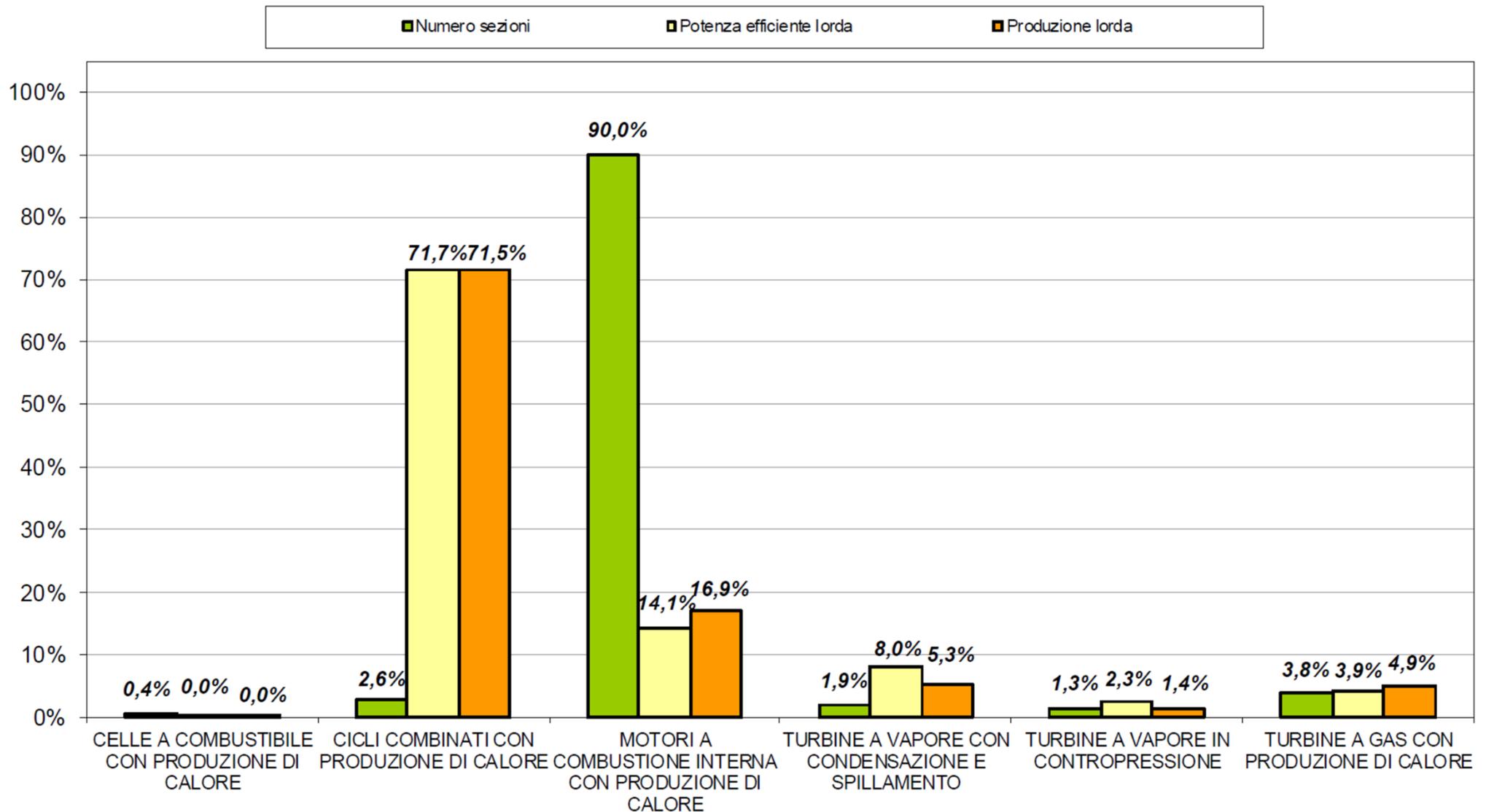


# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione in funzione della tecnologia utilizzata (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/E)

Numero totale sezioni: 5.674

Potenza efficiente lorda: 26.137 MW

Produzione lorda: 107,3 TWh

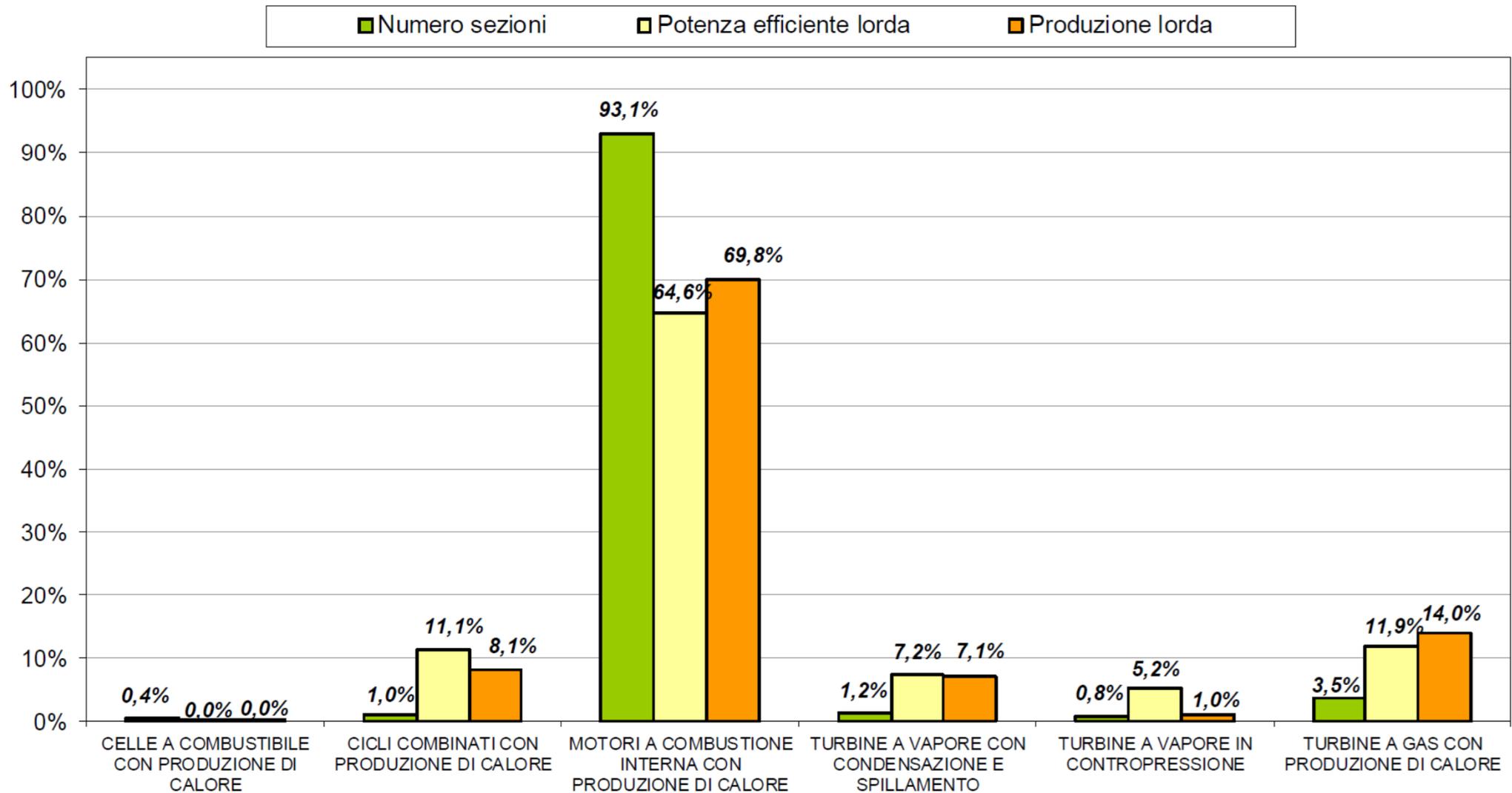


# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione GD in funzione della tecnologia utilizzata (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/E)

Numero totale sezioni: 5.405

Potenza efficiente lorda: 5.076 MW

Produzione lorda: 22,73 TWh

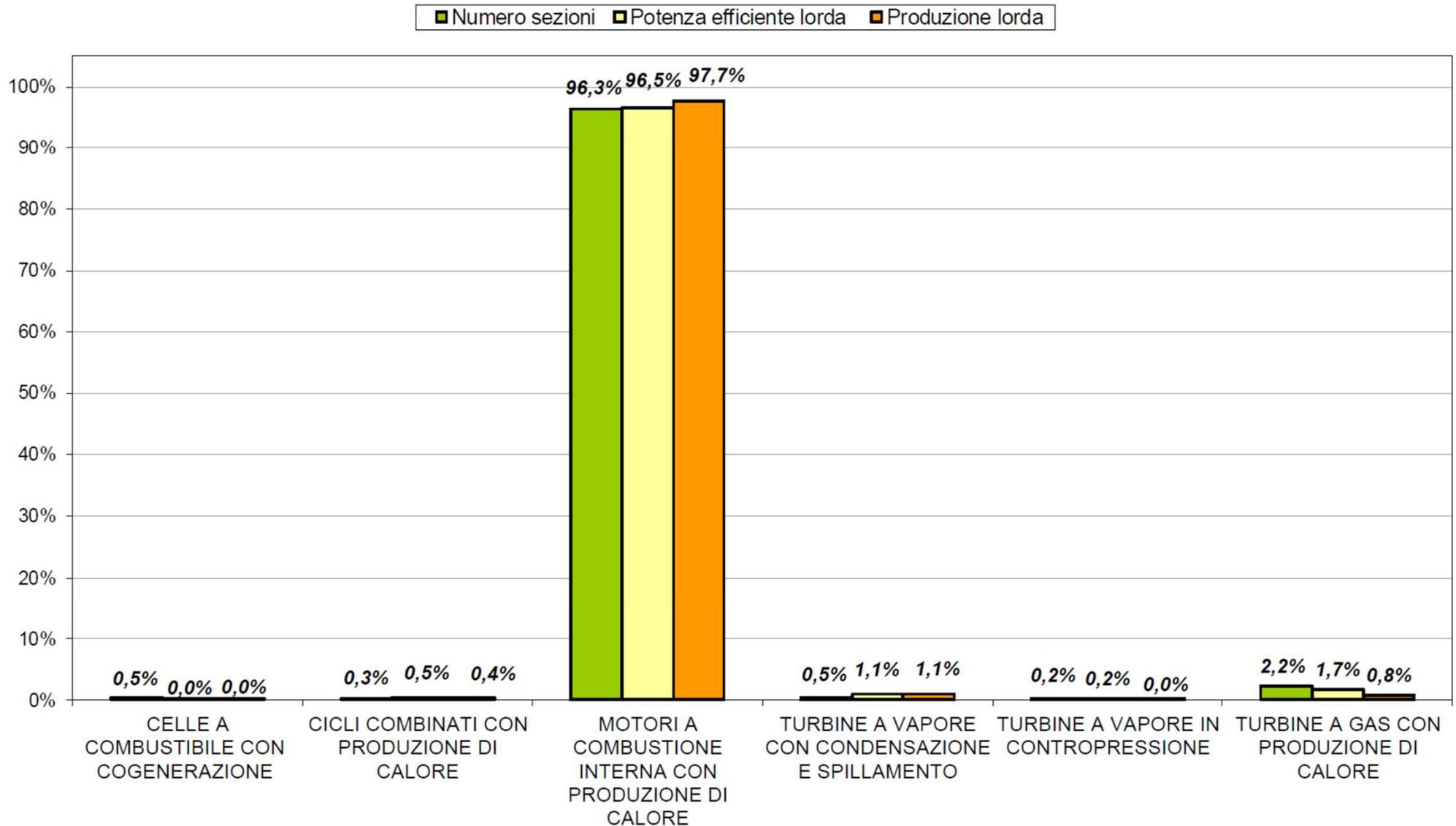


# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione PG in funzione della tecnologia utilizzata (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/E)

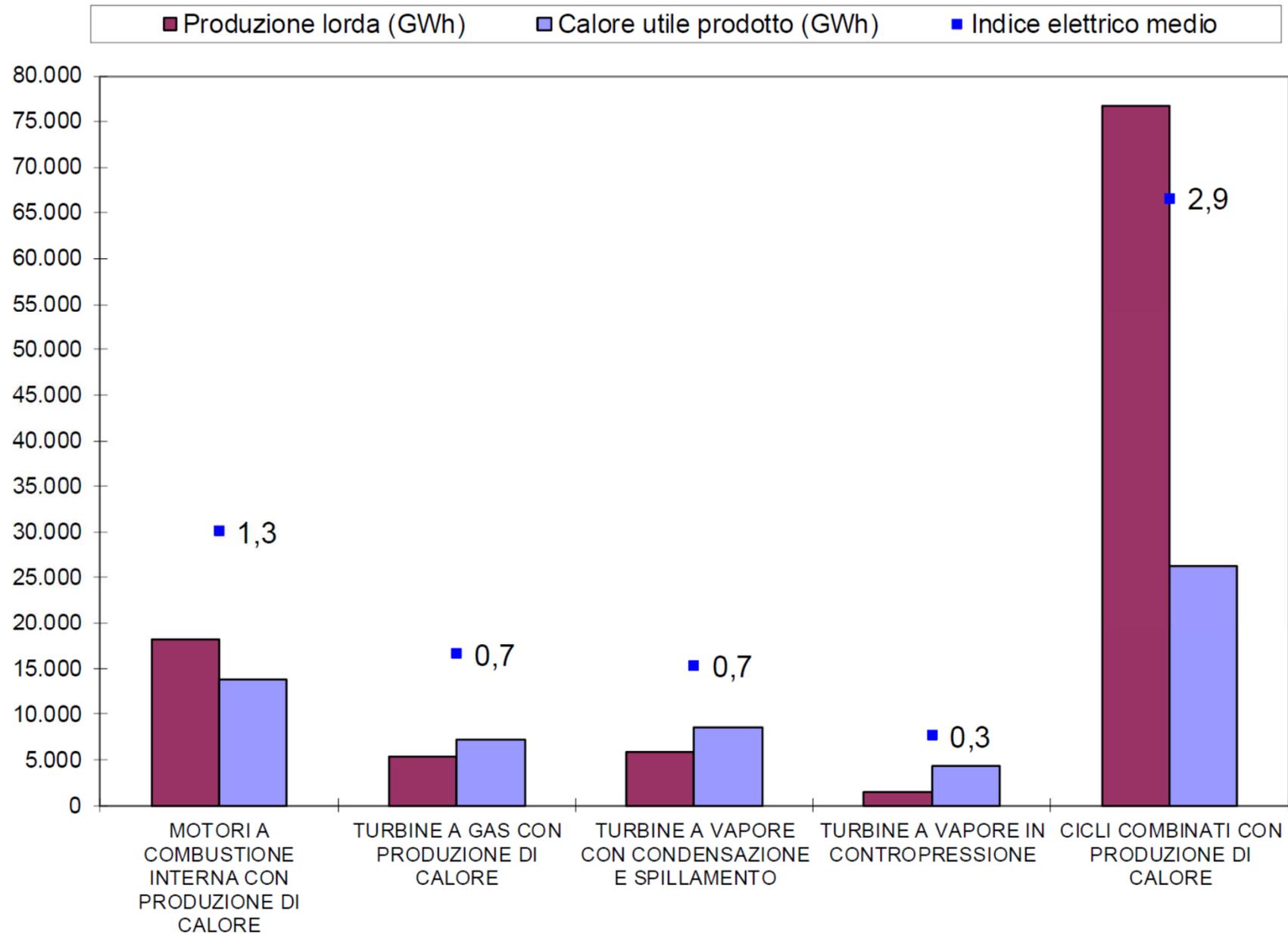
Numero totale sezioni: 4.180

Potenza efficiente lorda: 1.306 MW

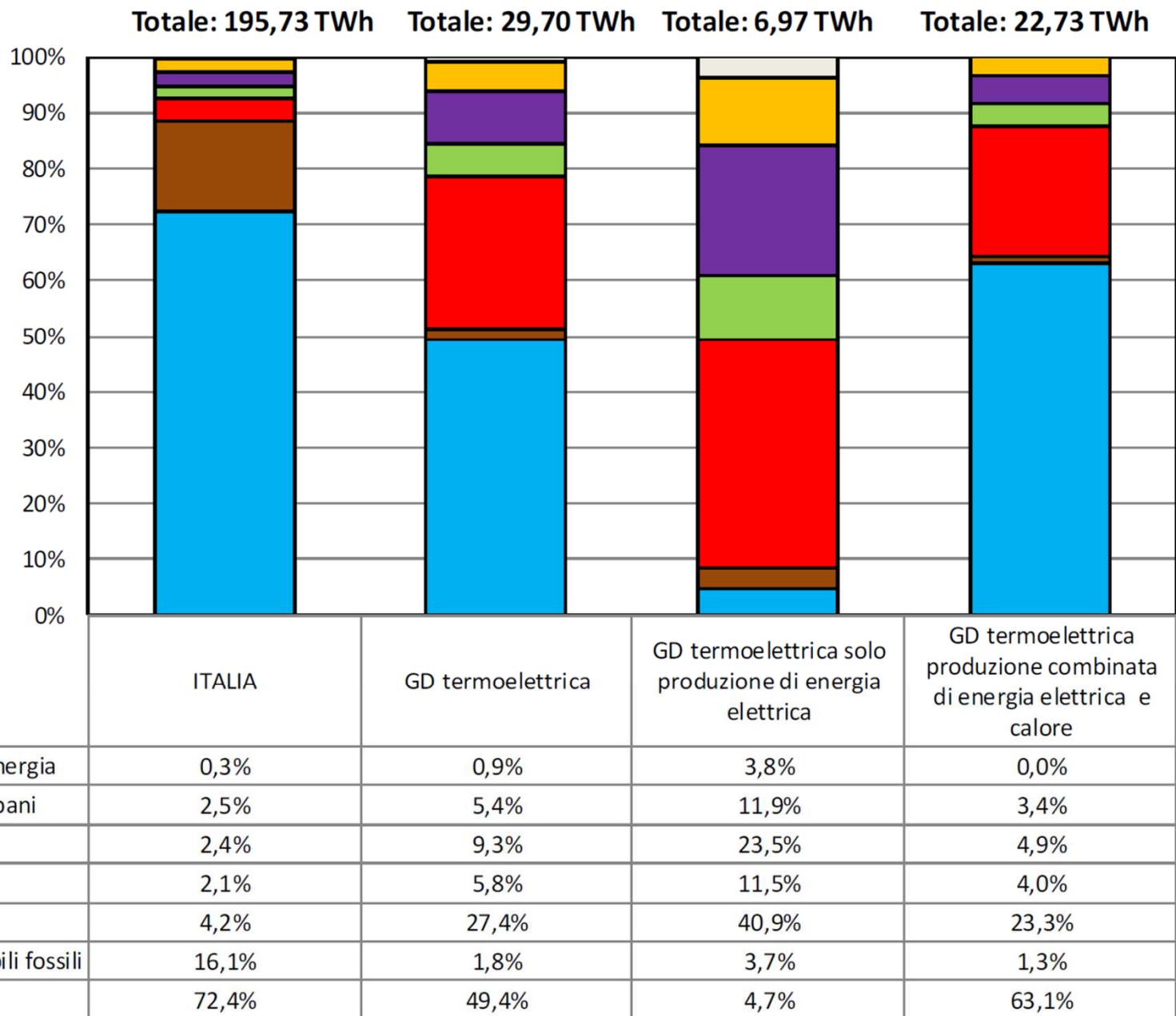
Produzione lorda: 7,22 TWh



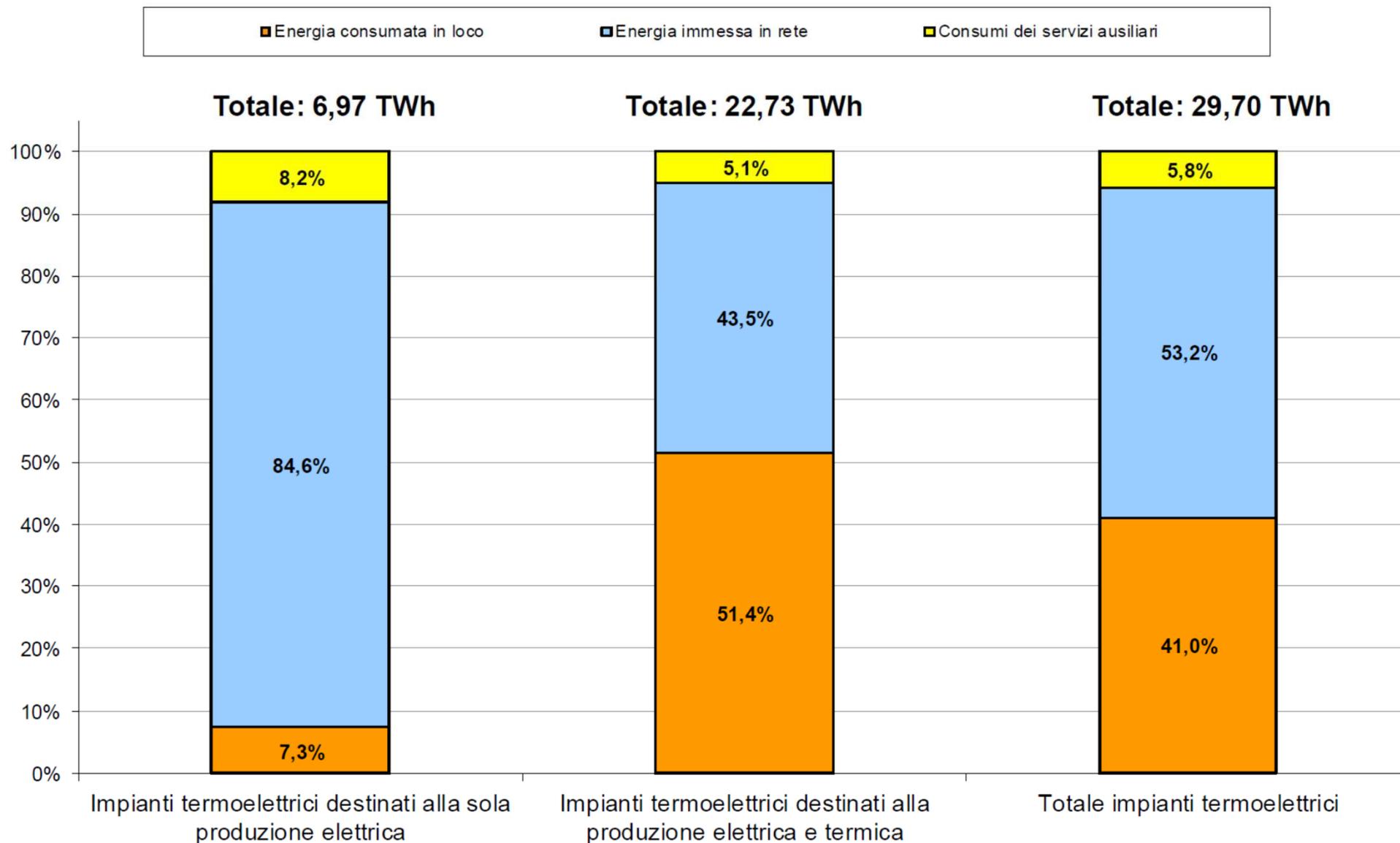
# Produzione elettrica e termica e indice elettrico ( $C = E_e/E_t$ ) degli impianti di cogenerazione in funzione della tecnologia utilizzata (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/EEL)



## Produzione termoelettrica lorda dalle diverse fonti (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/EEL)



# Ripartizione della produzione elettrica tra energia immessa in rete ed energia autoconsumata in loco nella GD (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/EEL)

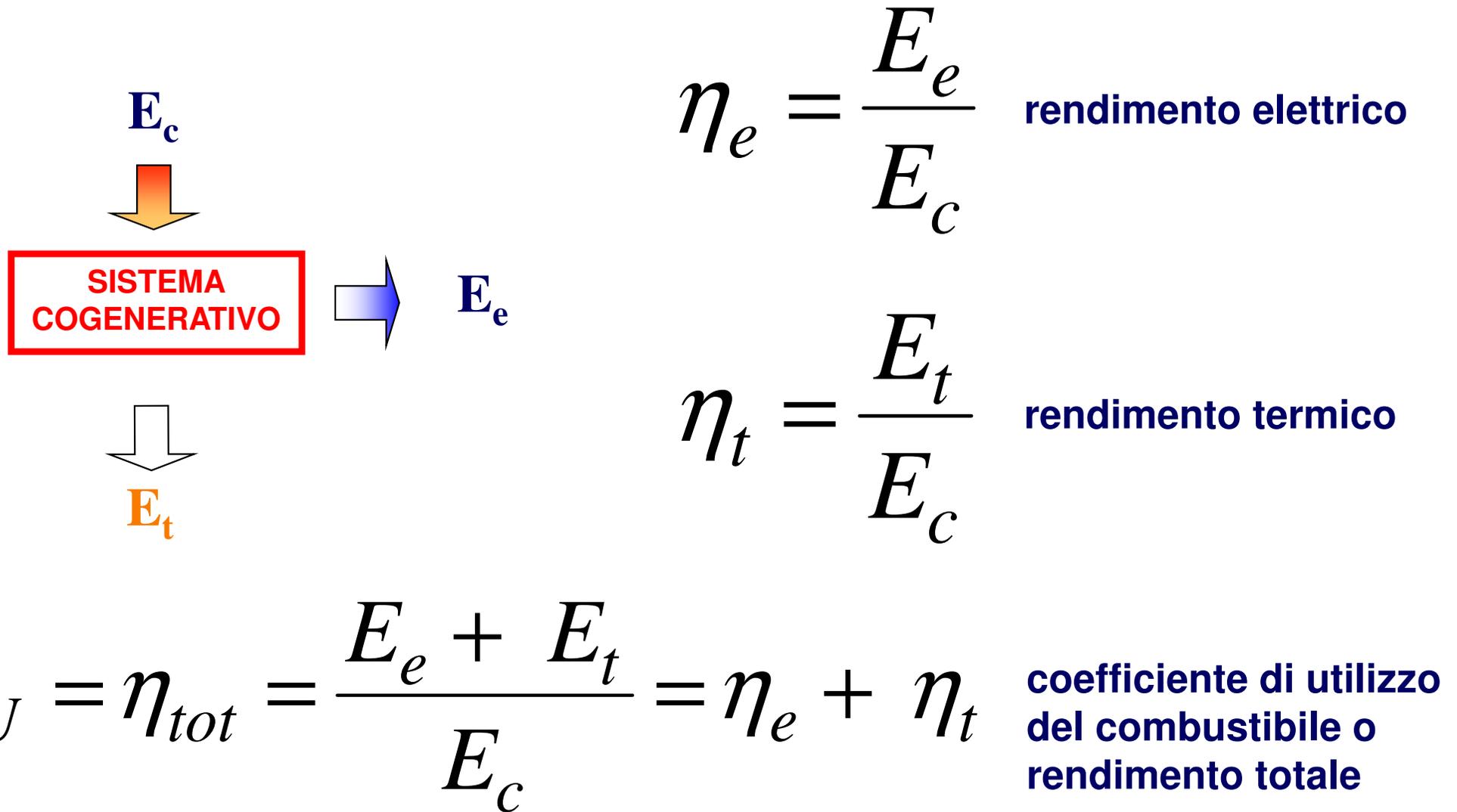


# *Le applicazioni della cogenerazione*

Taglia media delle sezioni cogenerative per settore di attività (dati GSE, anno 2006)

<b>Attività</b>	<b>taglia media (MWe)</b>	<b>Potenza installata (MWe)</b>
<b>Industria chimica e petrolchimica</b>	<b>114.3</b>	<b>2972</b>
<b>Raffinazione petrolio</b>	<b>136.6</b>	<b>2459</b>
<b>Industria cartaria</b>	<b>16.7</b>	<b>835</b>
<b>Industria siderurgica</b>	<b>185.0</b>	<b>370</b>
<b>Industria alimentare</b>	<b>11.9</b>	<b>202</b>
<b>Industria automobilistica</b>	<b>23.1</b>	<b>162</b>
<b>Industria ceramica</b>	<b>3.9</b>	<b>74</b>
<b>Riscaldamento e teleriscaldamento</b>	<b>12.5</b>	<b>997</b>
<b>Impianti sportivi, alberghi e ristoranti</b>	<b>0.1</b>	
<b>Commercio</b>	<b>0.5</b>	
<b>Ospedali</b>	<b>1</b>	
<b>Case di riposo e simili</b>	<b>1.5</b>	
<b>Concerie</b>	<b>2.0</b>	<b>529</b>
<b>Industria tessile, gomma e plastiche</b>	<b>3.0</b>	
<b>Industria elettronica</b>	<b>9.0</b>	
<b>Trasporti aerei</b>	<b>30.5</b>	

# Prestazioni di un cogeneratore



## Coefficiente di utilizzo del combustibile

Se calcolato con riferimento al potere calorifico inferiore (PCI) il limite superiore non è 100%

$$\eta_U < \frac{PCS}{PCI}$$

Combustibile	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]	PCS/PCI
idrogeno	144 000	121 000	119%
metanolo	22 513	19 700	114%
gas naturale	55 765	50 140	111%
gpl	50 071	46 100	109%
gasolio	45 785	42 860	107%
carbone (antracite)	34 378	33 500	103%
olio vegetale (colza)	40 033	37 400	107%
biodiesel	39 800	37 100	107%
olio vegetale (palma)	39 133	36 500	107%
olio combustibile	43 700	41 000	107%
olio vegetale (soia)	39 343	36 800	107%
biogas	19 679	17 699	111%
gas d'altoforno	6 725	6 050	111%

# *Prestazioni di un cogeneratore*

**Primo principio termodinamica**

**ENERGIA TERMICA = ENERGIA MECCANICA**

**Secondo principio termodinamica**

**ENERGIA TERMICA  $\neq$  ENERGIA MECCANICA**

**1 kJ di ACQUA CALDA  $\neq$  1 kJ di VAPORE  $\neq$  1 kJ di ELETTRICITA'**

# *Prestazioni di un cogeneratore*

## **Rendimento di primo principio**

$$\eta_I = \eta_{tot} = \frac{\textit{produzione utile}}{\textit{energia immessa con il combustibile}}$$

## **Rendimento di secondo principio**

$$\eta_{II} = \frac{\textit{produzione utile pesata "termdinamicamente"}}{\textit{energia immessa con il combustibile}}$$

## Il rendimento di secondo principio

$$\eta_{II} = \frac{\text{produzione utile pesata "termodinamicamente"}}{\text{energia immessa con il combustibile}}$$

$$\eta_{II} = \frac{E_e + \varepsilon E_t}{E_c}$$

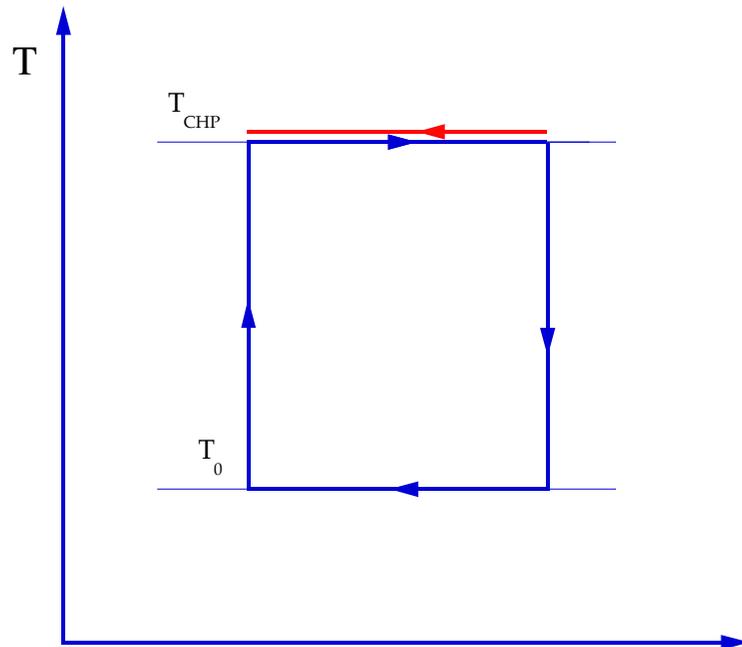
Equivalente elettrico del calore

$$\varepsilon = \eta_{em} \mu = \eta_{em} (\eta' \eta_{rev})$$

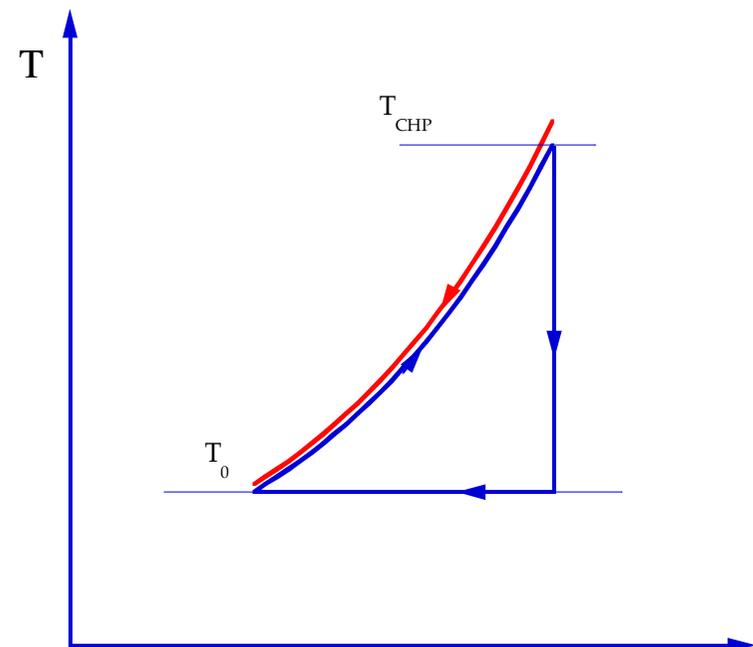
Equivalente meccanico del calore

## Il rendimento di secondo principio

$$\varepsilon = \eta_{em} (\eta' \eta_{rev}) = f(T_{CHP}, \text{natura sorgente di calore})$$



$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_0}{T_{CHP}}$$



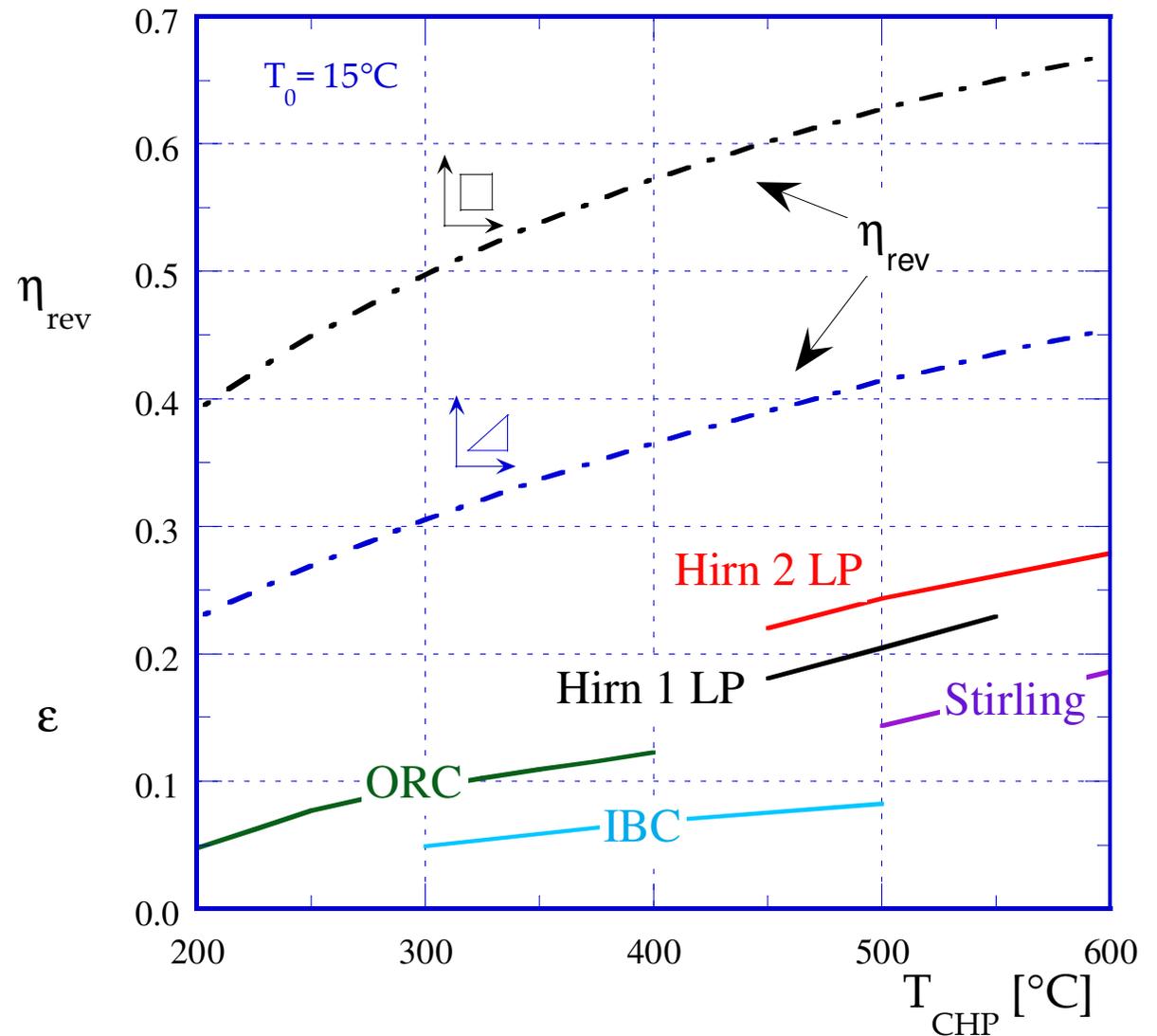
$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_0}{T_{ml,CHP}}$$

$$T_{ml,CHP} = \frac{T_{CHP} - T_0}{\ln(T_{CHP}/T_0)}$$

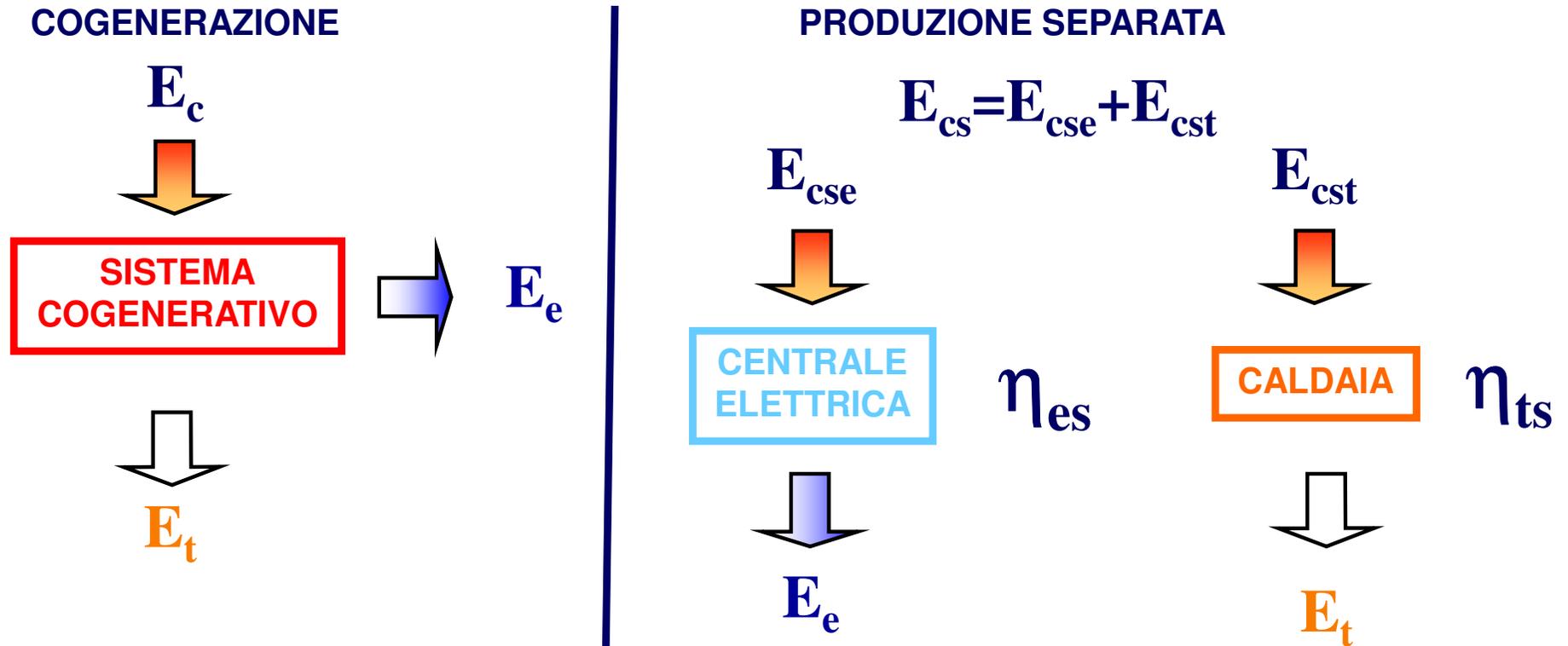
# Il rendimento di secondo principio

$$\eta_{II} = \frac{E_e + \varepsilon E_t}{E_c}$$

$$\varepsilon = \eta_{em} (\eta' \eta_{rev})$$



# Il confronto con la produzione separata



$$IRE = PES = \frac{E_{cs} - E_c}{E_{cs}} = 1 - \frac{E_c}{\frac{E_e}{\eta_{es}} + \frac{E_t}{\eta_{ts}}} = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_e}{\eta_{es}} + \frac{\eta_t}{\eta_{ts}}}$$

## Il confronto con la produzione separata

$$\begin{aligned} IRE = PES &= \frac{E_{cs} - E_c}{E_{cs}} = 1 - \frac{E_c}{\frac{E_e}{\eta_{es}} + \frac{E_t}{\eta_{ts}}} = \\ &= 1 - \frac{1}{\frac{E_e + \frac{\eta_{es}}{\eta_{ts}} E_t}{E_c}} \eta_{es} = 1 - \frac{1}{\frac{E_e + \varepsilon' E_t}{E_c}} \eta_{es} = 1 - \frac{1}{\eta_{II}} \eta_{es} \end{aligned}$$

$$\varepsilon' = \frac{\eta_{es}}{\eta_{ts}} = \frac{0.530}{0.920} = 0.576 \gg \varepsilon_{reale}$$

# L'importanza del recupero termico

