

# **SISTEMI ENERGETICI COGENERATIVI**

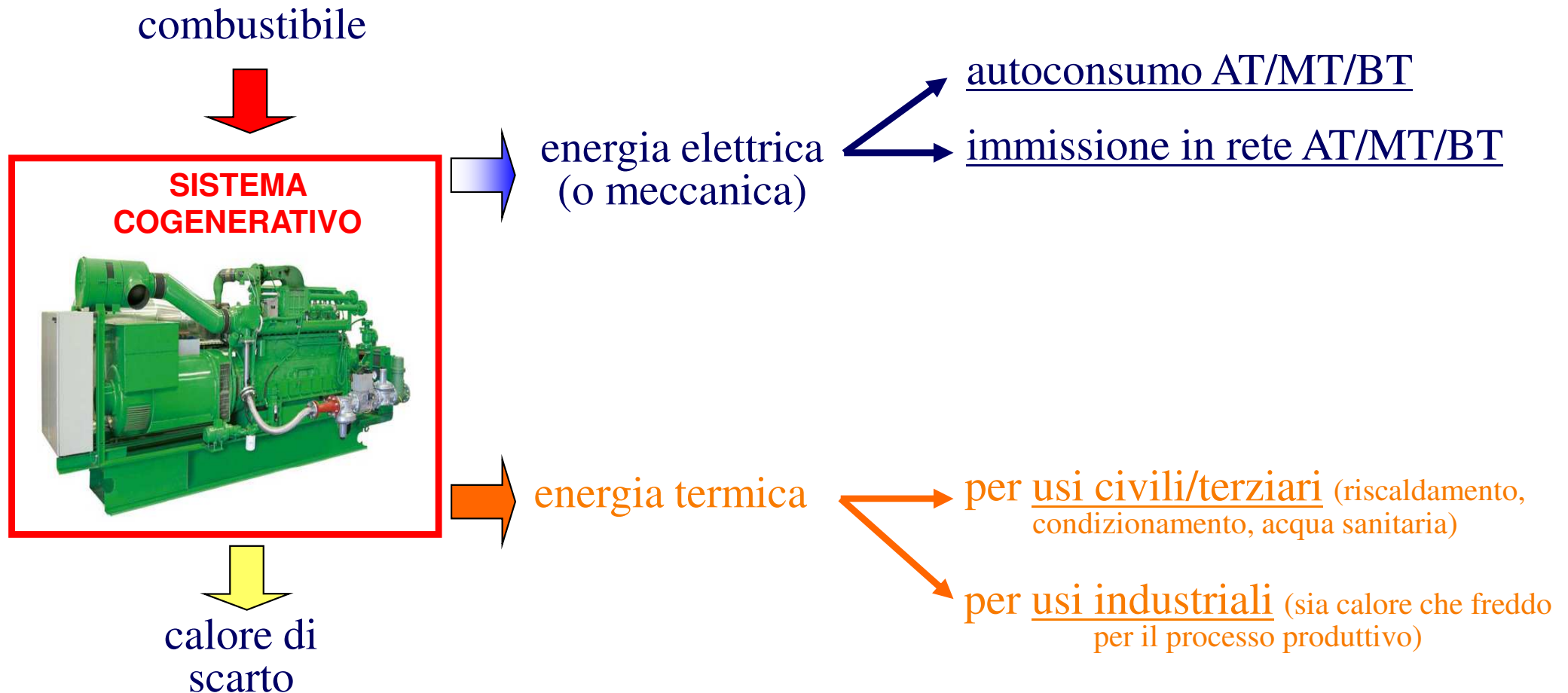
**Aspetti tecnici ed energetici**

**Prof. Pier Ruggero Spina**

**Dipartimento di Ingegneria - Università di Ferrara**

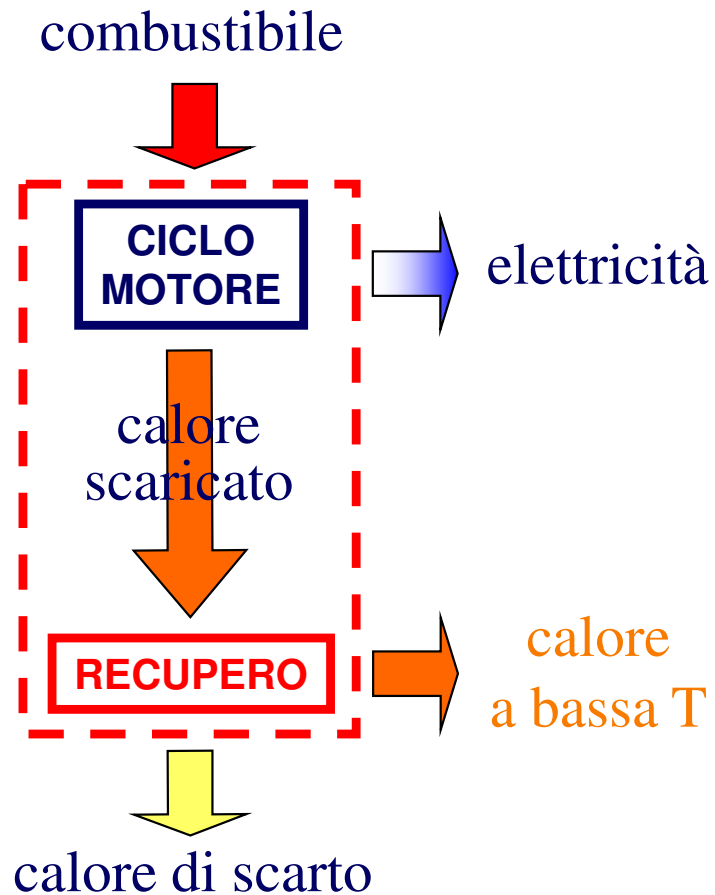
# La cogenerazione

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

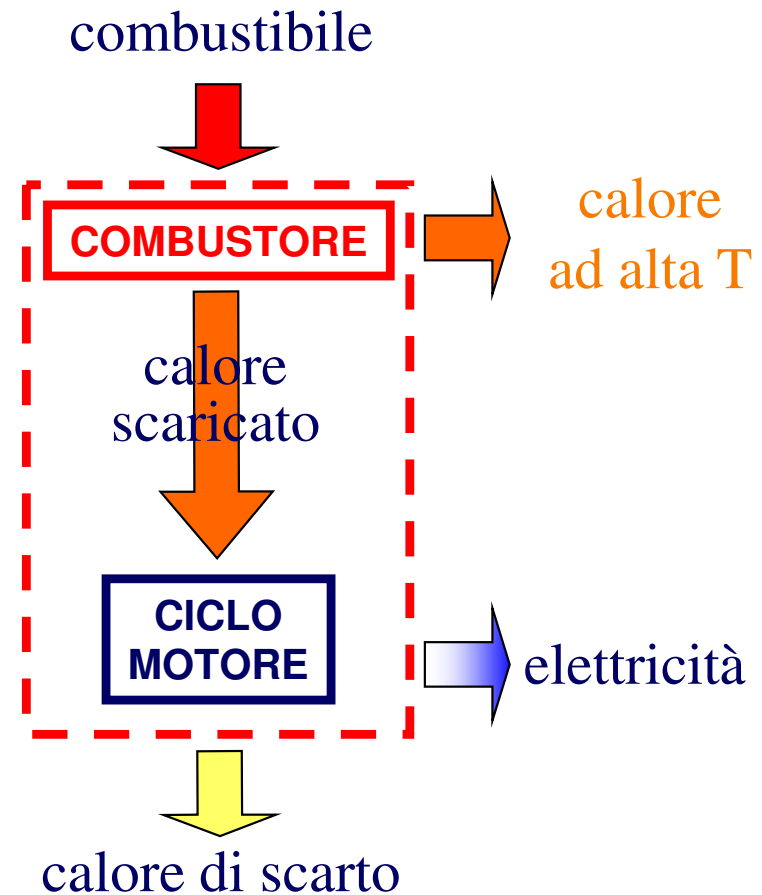


# Cogenerazione “topping” o “bottoming”

## TOPPING

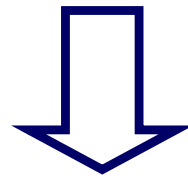


## BOTTOMING



## *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*

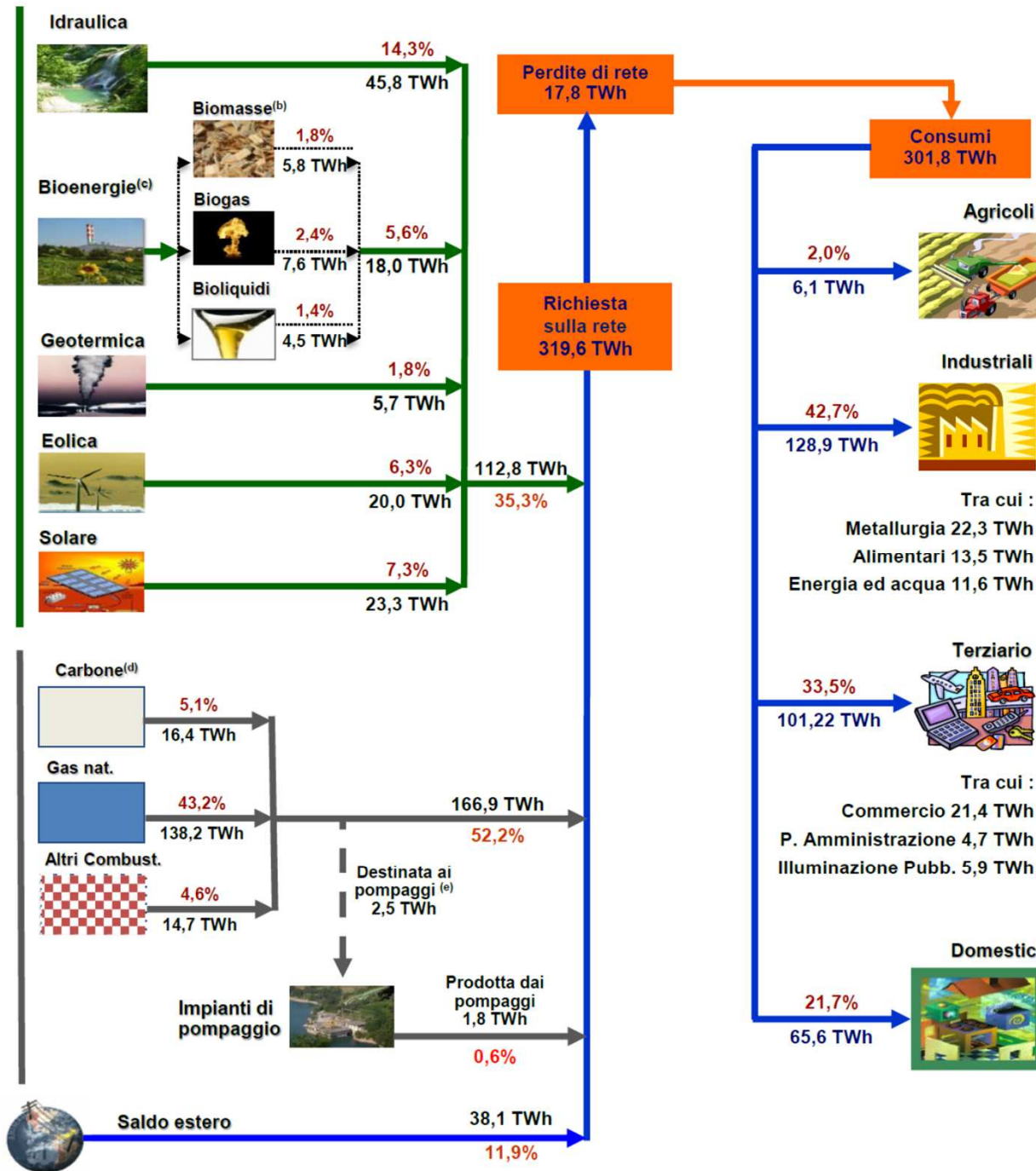
- ✓ Introduzione di nuove sorgenti emissive in aree urbane o comunque densamente popolate

## 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 |
|-----|------|------|-----------|
|-----|------|------|-----------|

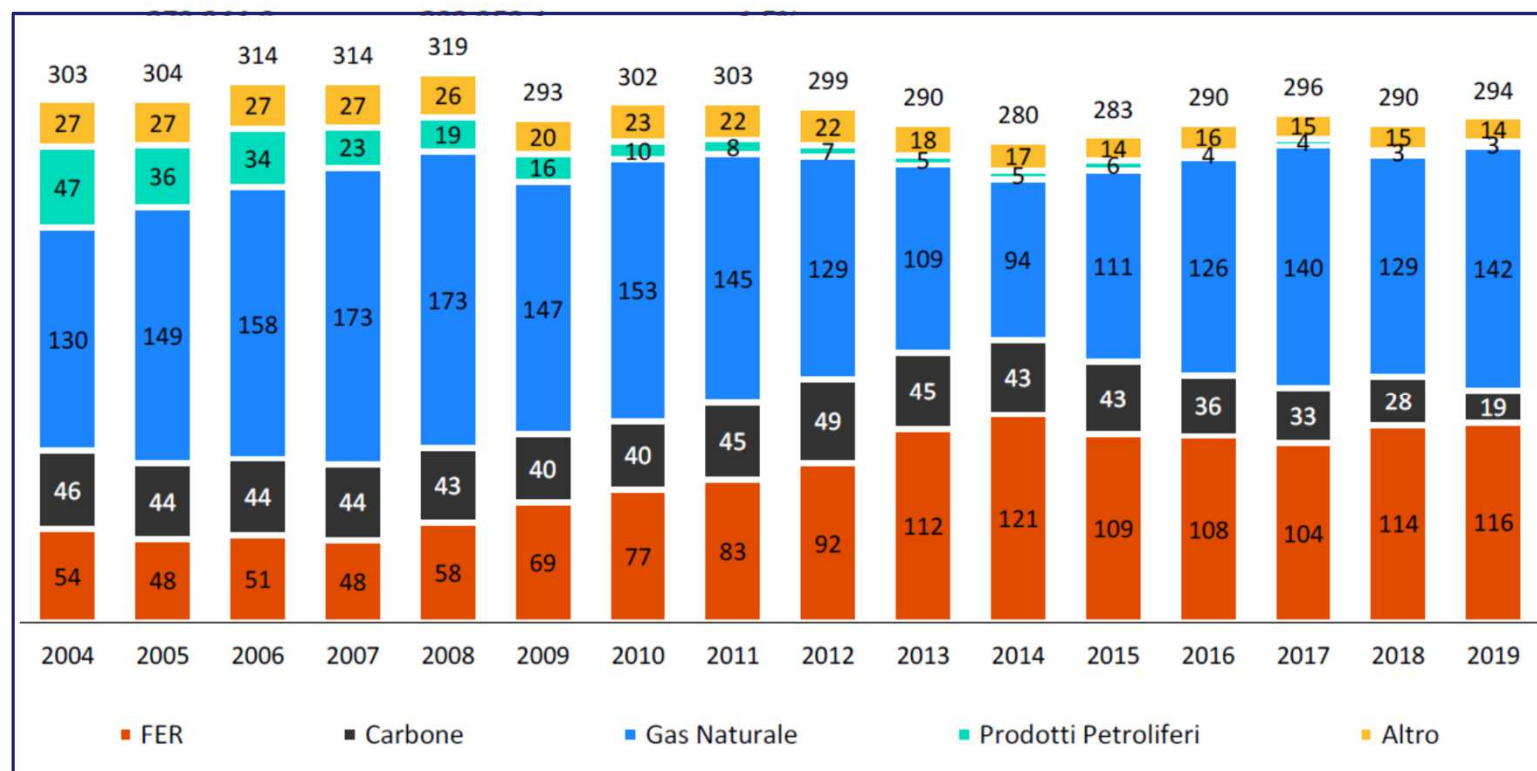
|                               |           |           |       |
|-------------------------------|-----------|-----------|-------|
| Produzione lorda              | 289.708,4 | 293.853,2 | 1,4%  |
| - idrica                      | 50.502,8  | 48.153,5  | -4,7% |
| - termica                     | 192.730,0 | 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         |
| <b>RICHIESTA</b>                |



| 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%  |

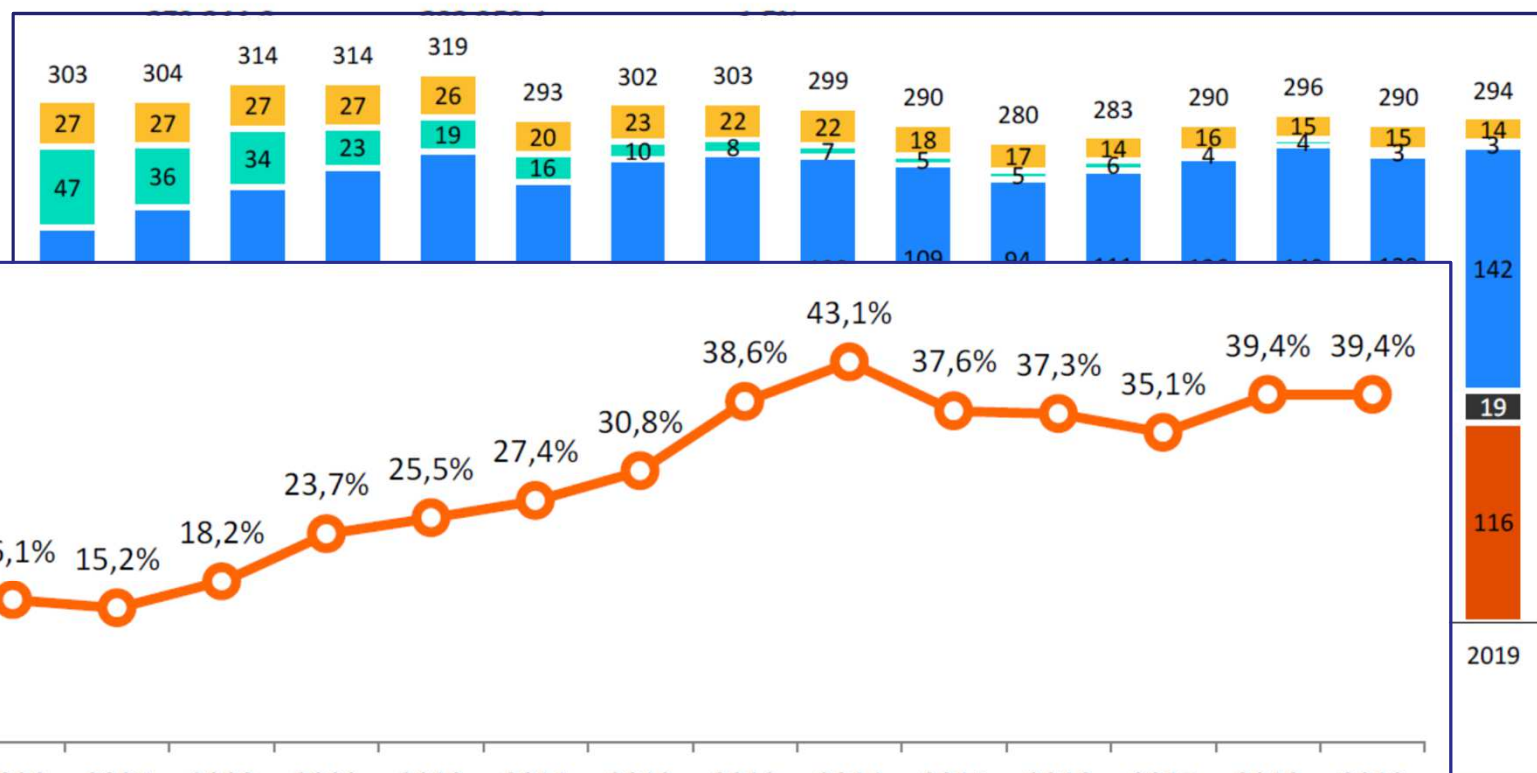
# Bilancio elettrico nazionale anni 2018 e 2019

(Dati Statistici Terna anno 2019)

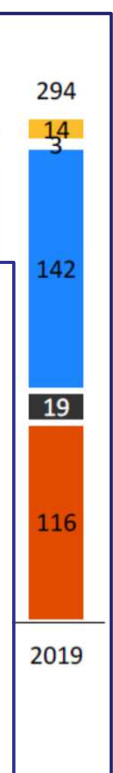
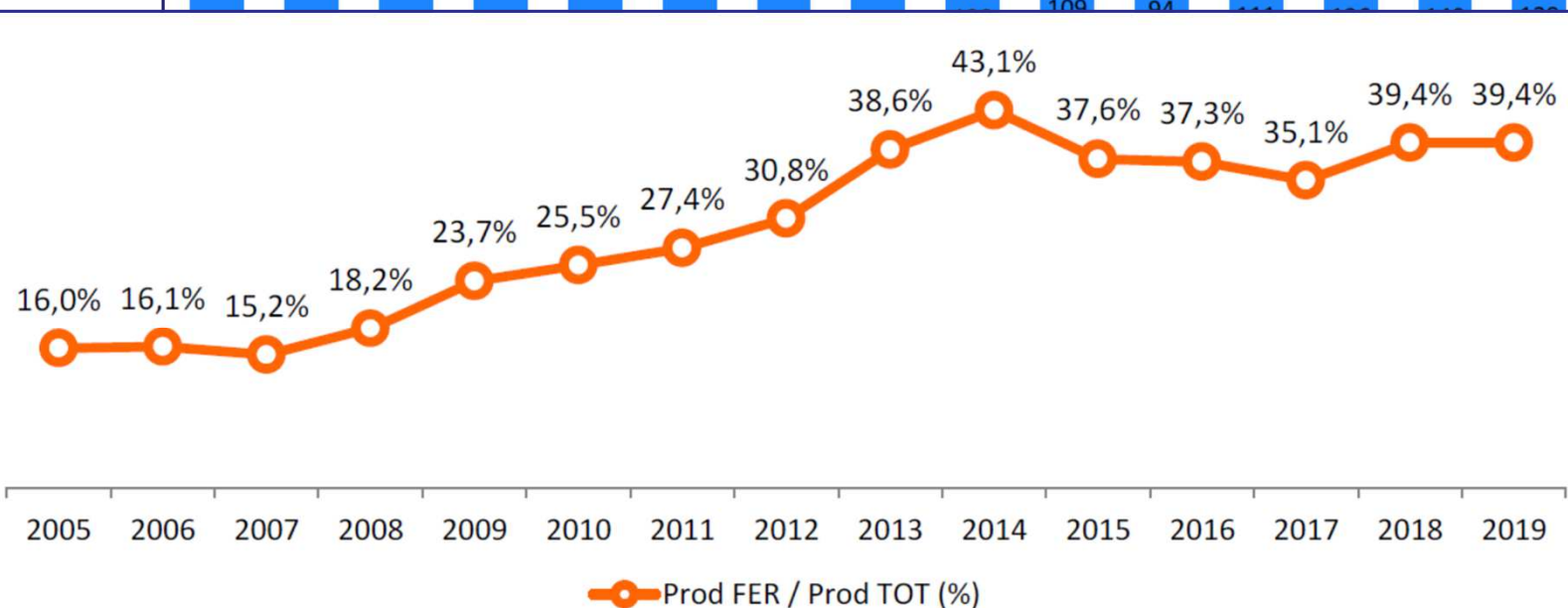
Produzione elettrica lorda [TWh]

## Produzione netta

- idrica
- termica
- geotermica
- eolica
- fotovoltaica

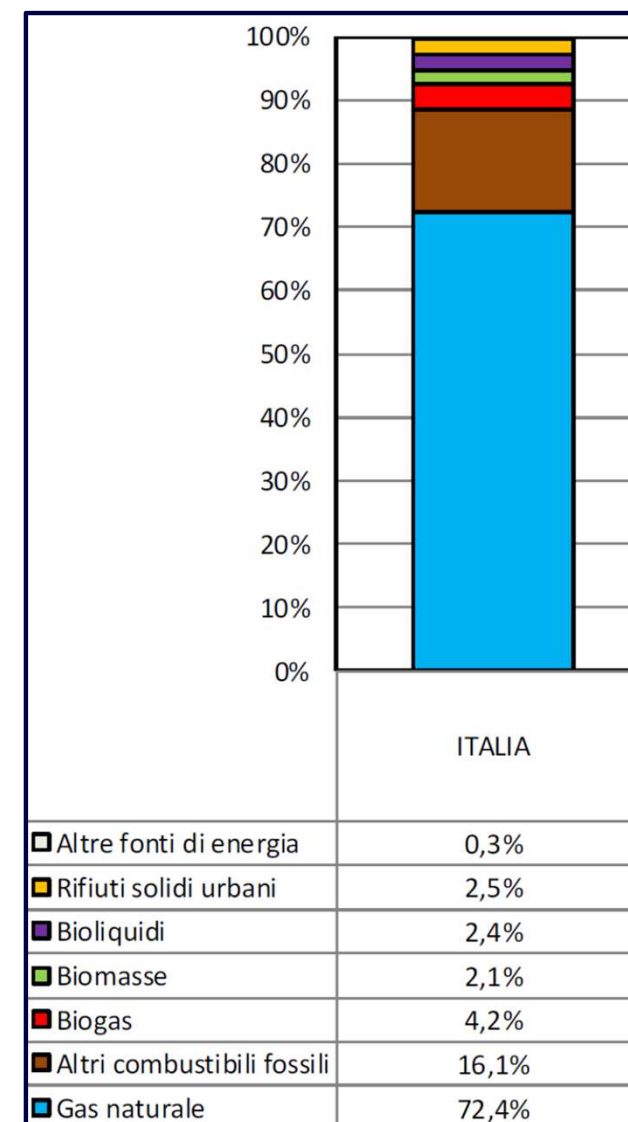


- Destinata ai pompaggi
- Produzione destinata al
- Ricevuta da fornitori est
- Ceduta a clienti esteri
- RICHIESTA**



| 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> |

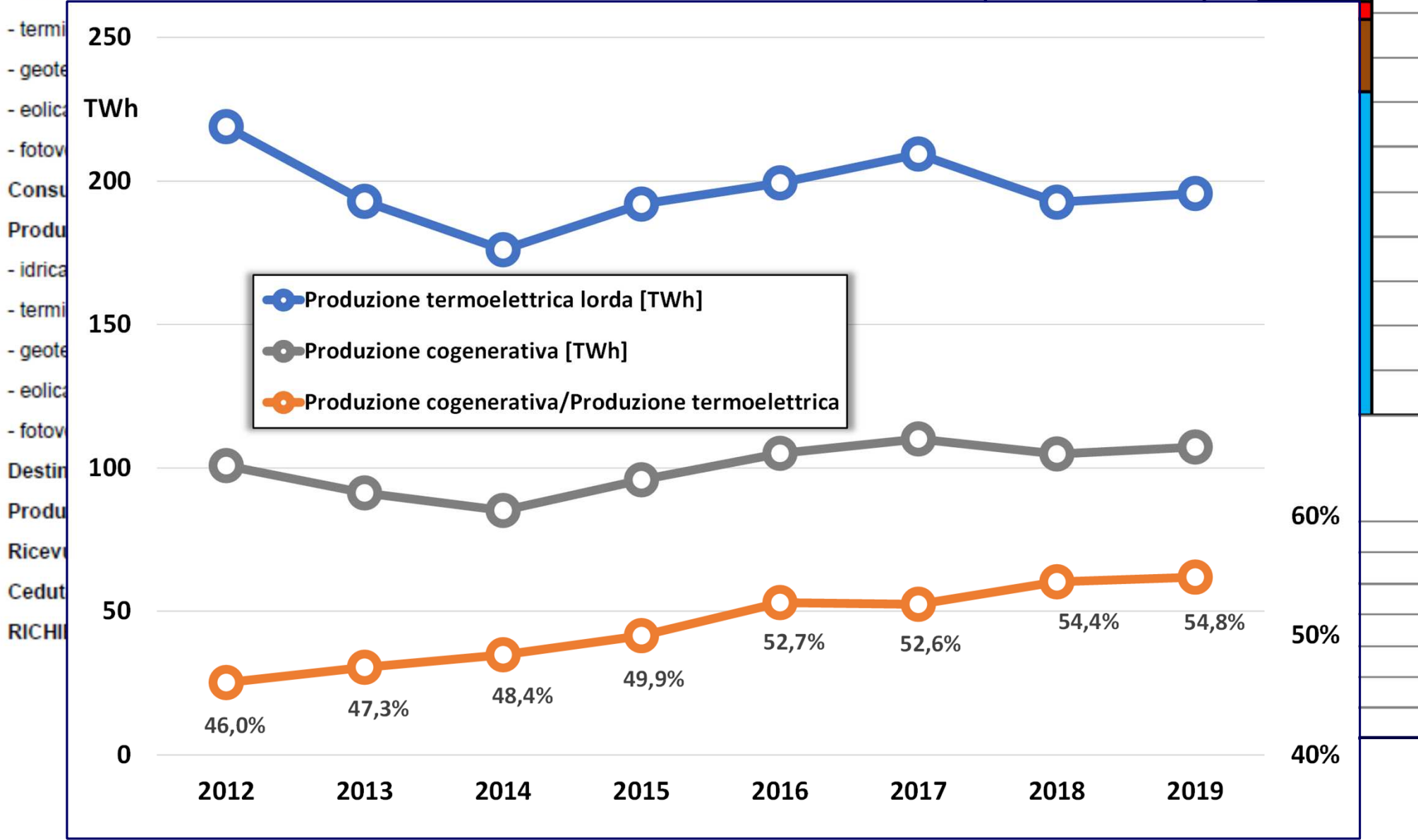
## Produzione termoelettrica lorda anno 2019: 195,7 TWh



**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% |

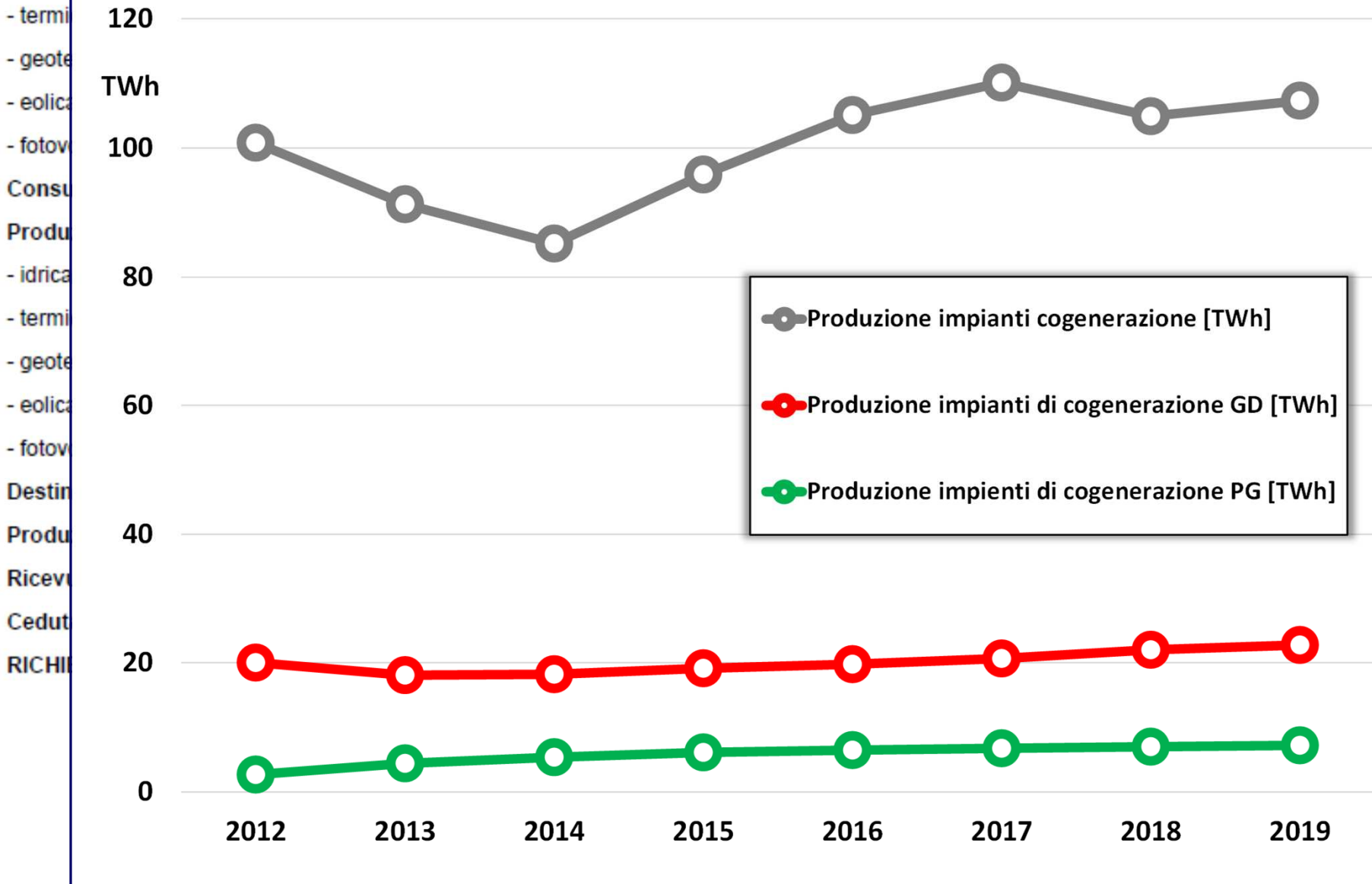
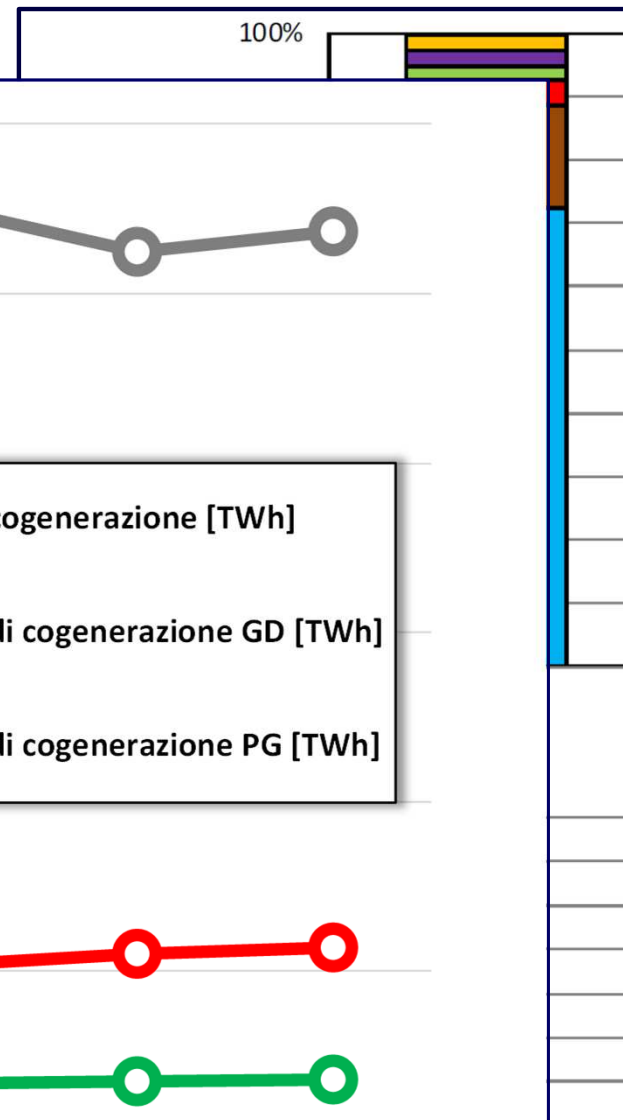




GWh 2018 2019 2019/2018

Produzione termoelettrica  
lorda anno 2019: 195,7 TWh

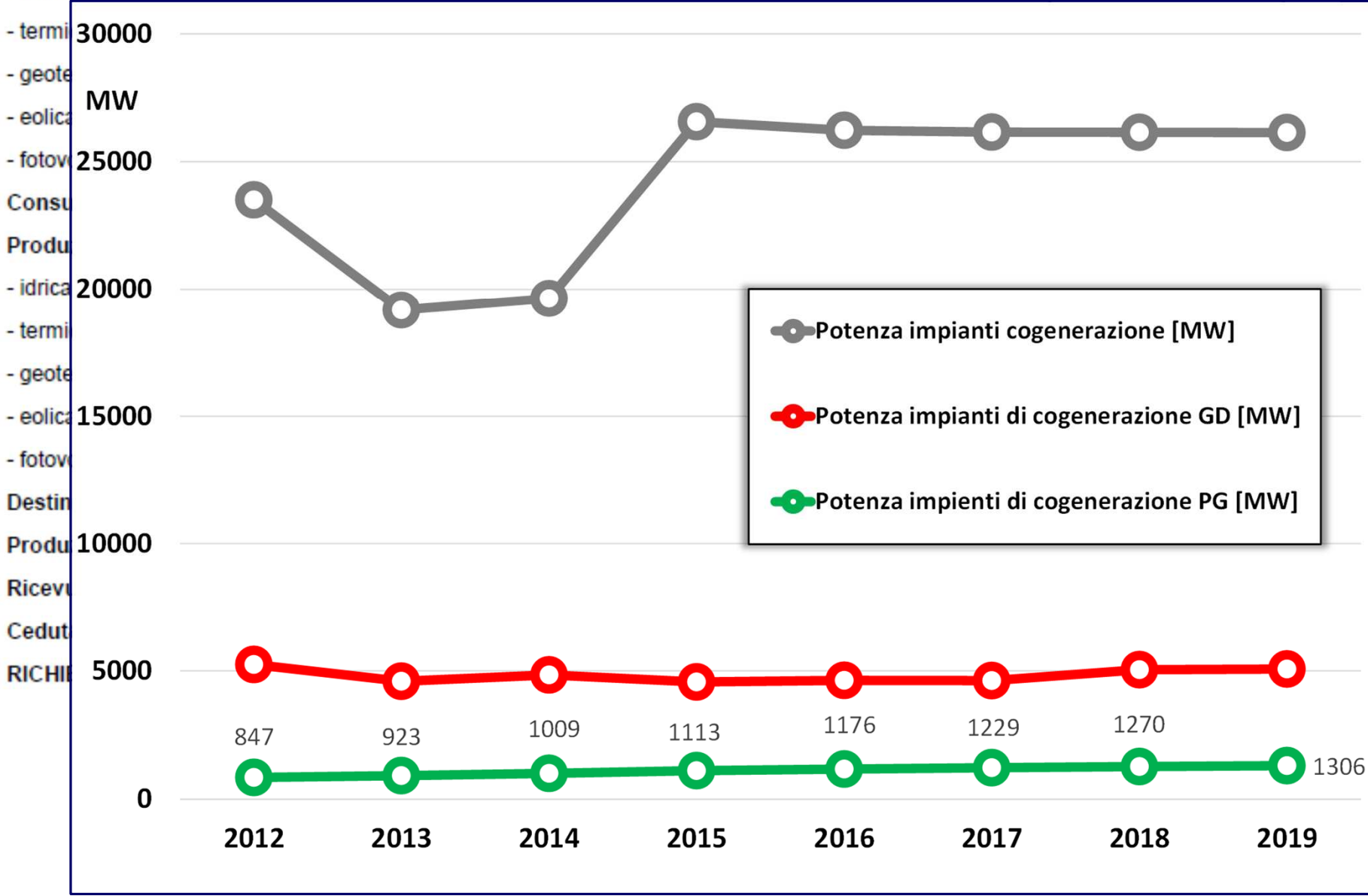
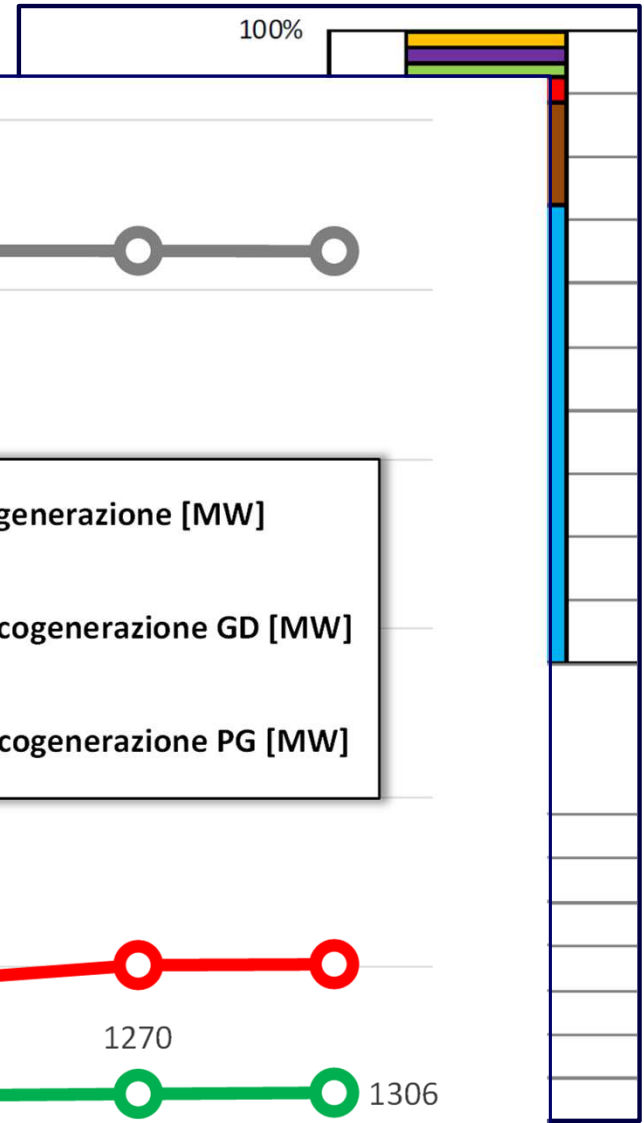
|                  |           |           |       |
|------------------|-----------|-----------|-------|
| Produzione lorda | 289.708,4 | 293.853,2 | 1,4%  |
| - idrica         | 50.502,8  | 48.153,5  | -4,7% |



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%

100%

- termi

6000

- geote

- eolica

- fotov

Consumo

5000

Produzione

- idrica

4000

- termi

- geote

- eolica

- fotov

Destinazione

3000

Produzione

Ricevuta

2000

Ceduta

RICHIESTA

1000

2012

2013

2014

2015

2016

2017

2018

2019

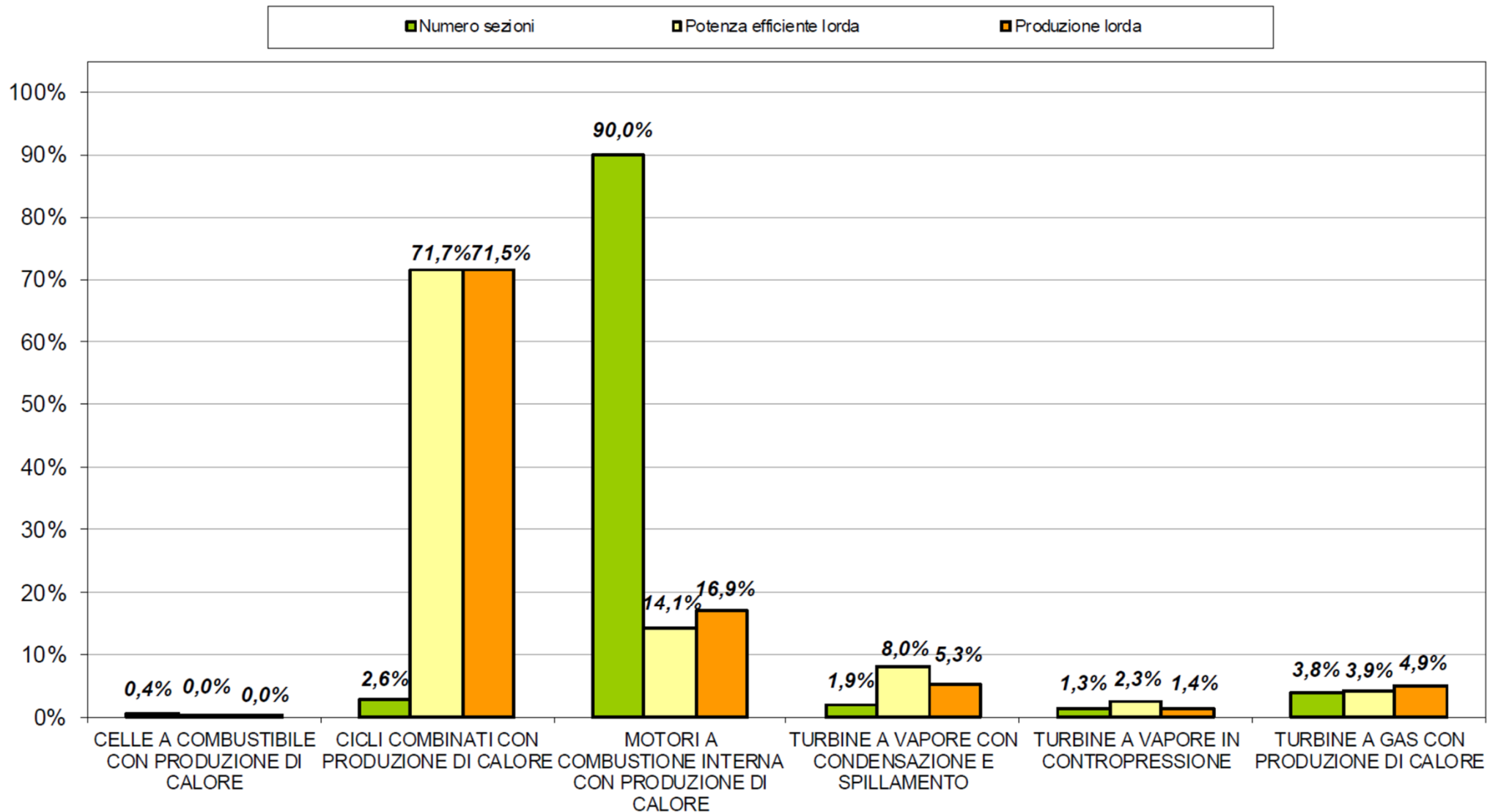
- Numero sezioni di cogenerazione
- Numero sezioni di cogenerazione GD
- Numero sezioni di cogenerazione PG

# 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

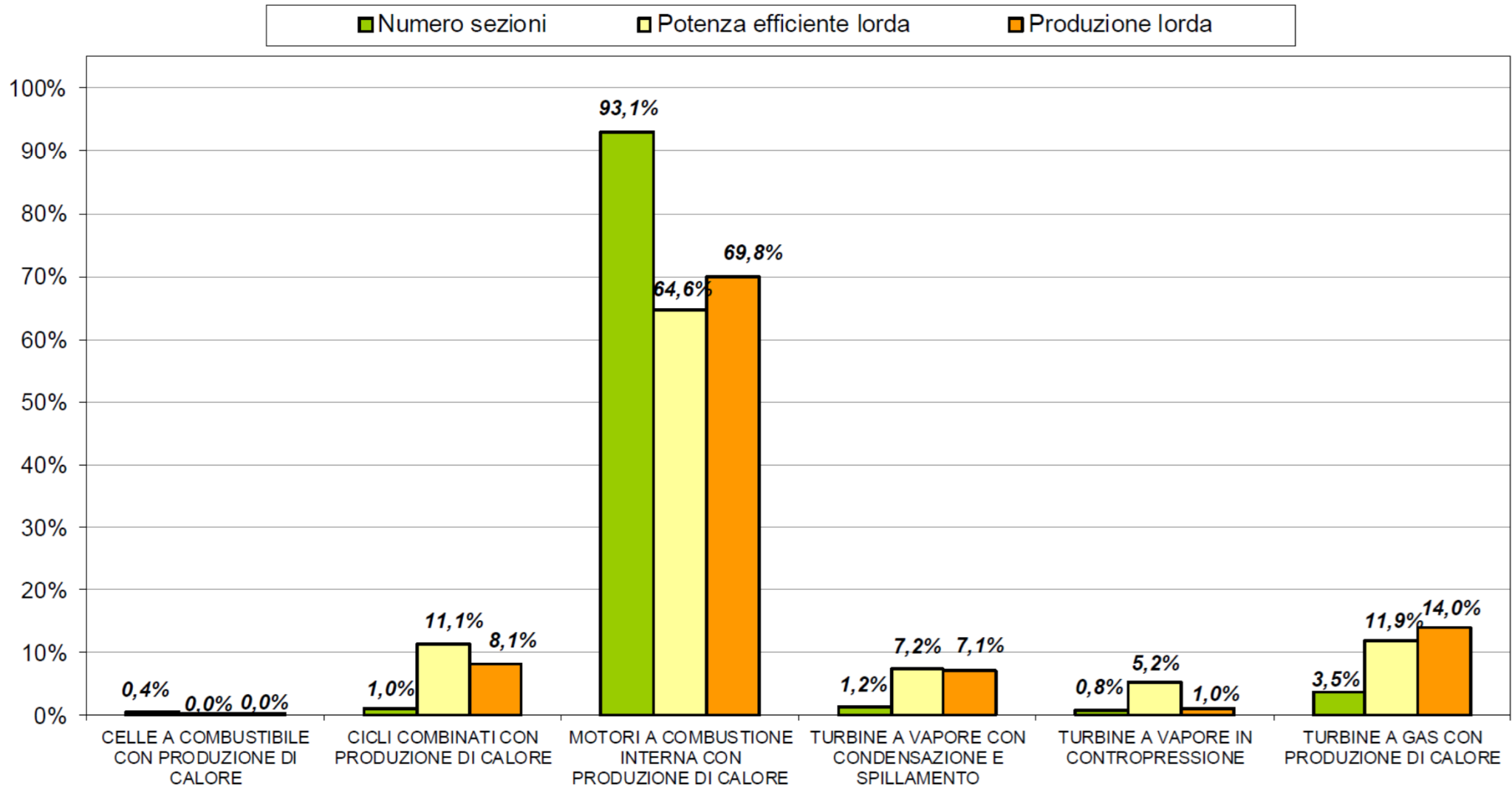


# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione GD in funzione della tecnologia utilizzata (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/E)

Numero totale sezioni: 5.405

Potenza efficiente lorda: 5.076 MW

Produzione lorda: 22,73 TWh

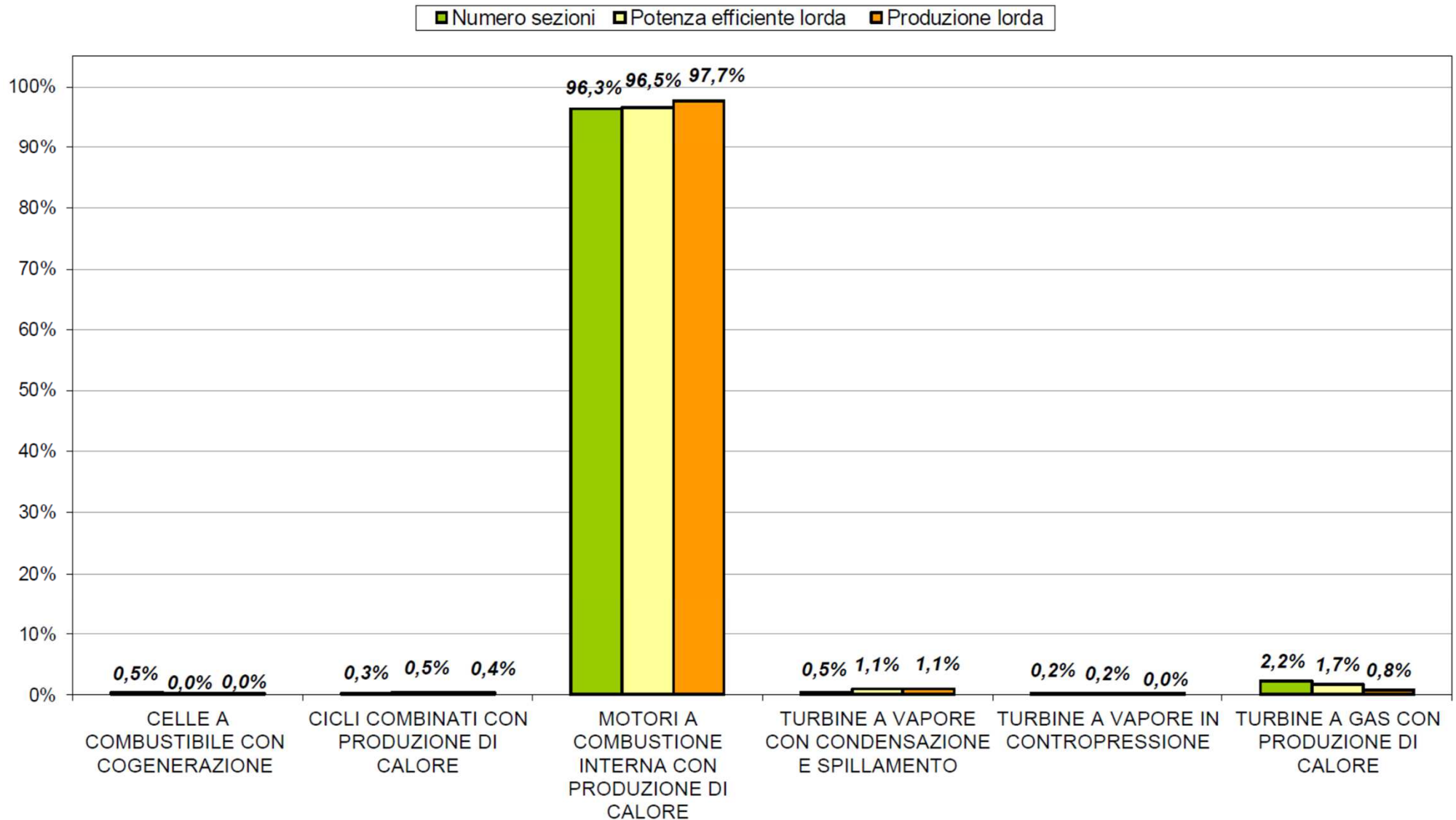


# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione PG in funzione della tecnologia utilizzata (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/E)

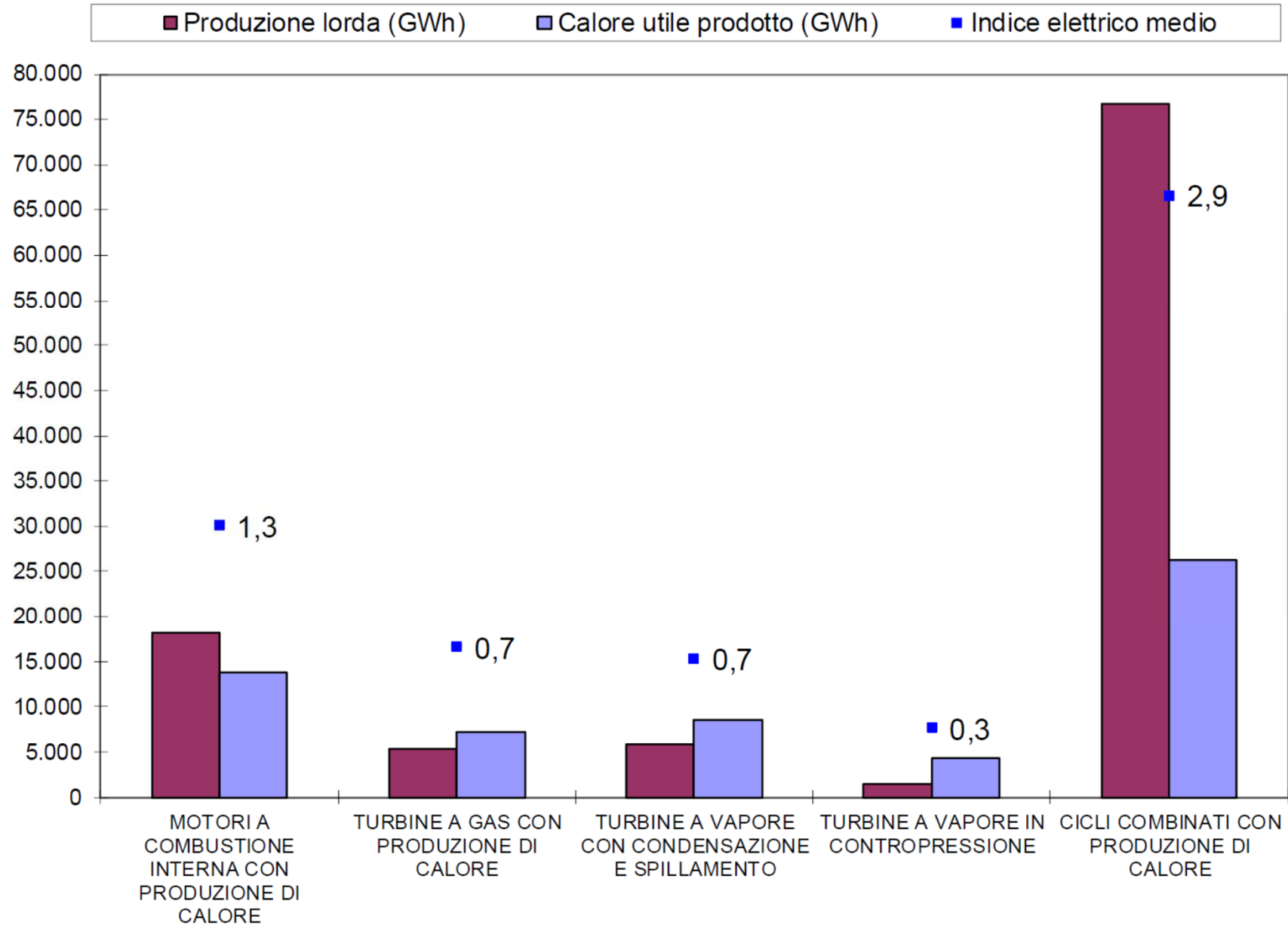
Numero totale sezioni: 4.180

Potenza efficiente lorda: 1.306 MW

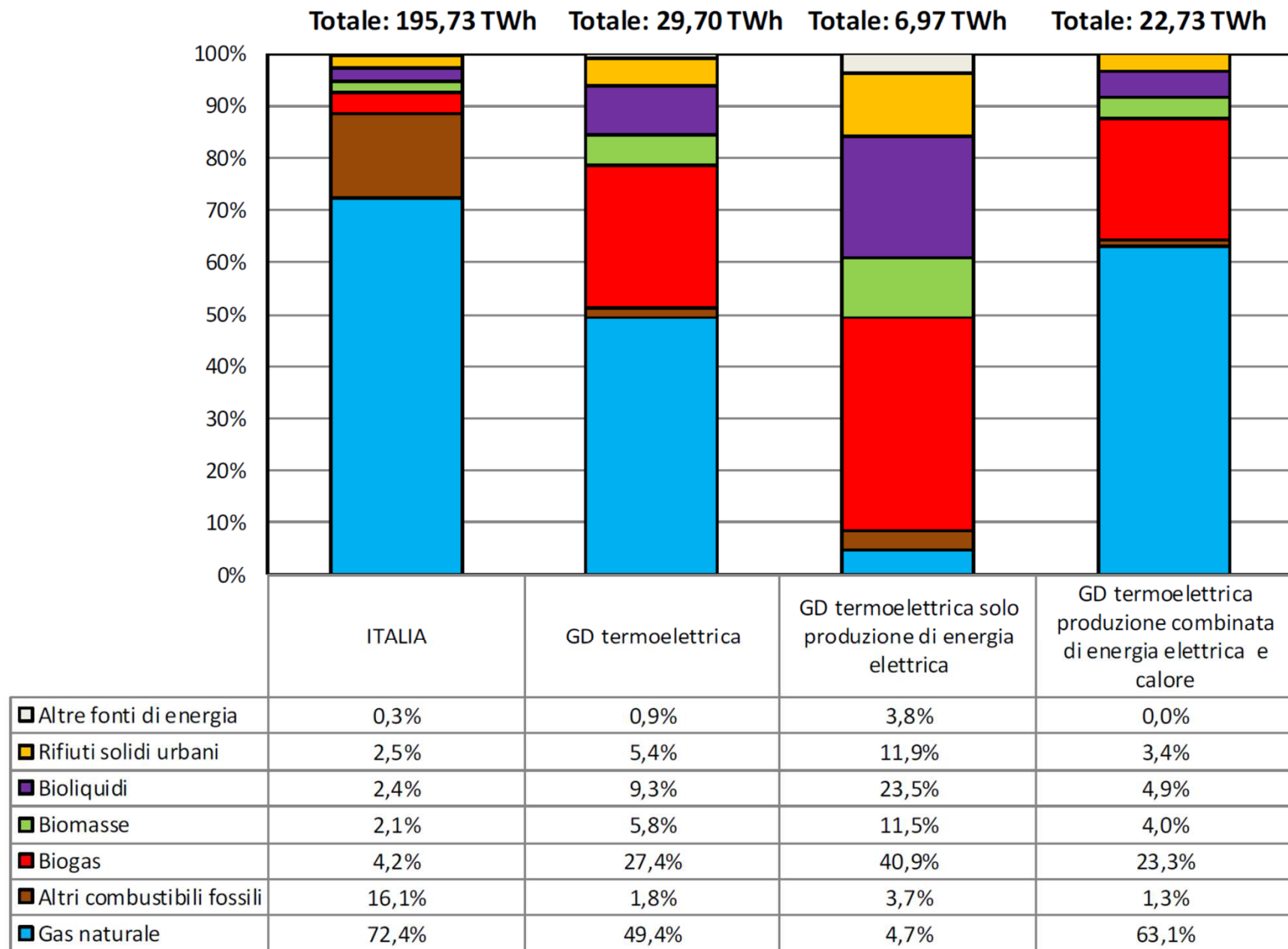
Produzione lorda: 7,22 TWh



# 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)

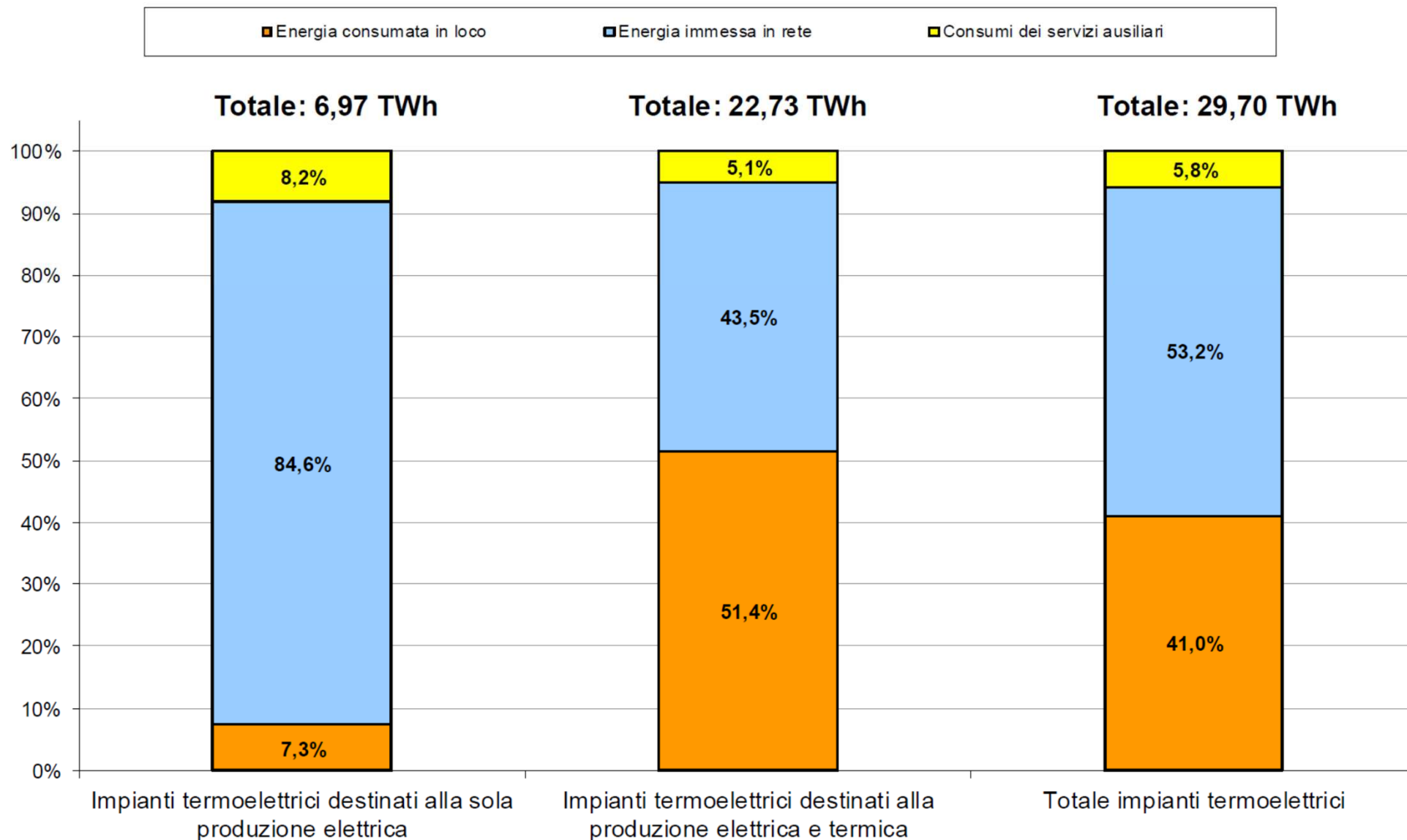


## Produzione termoelettrica lorda dalle diverse fonti (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/EEL)





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

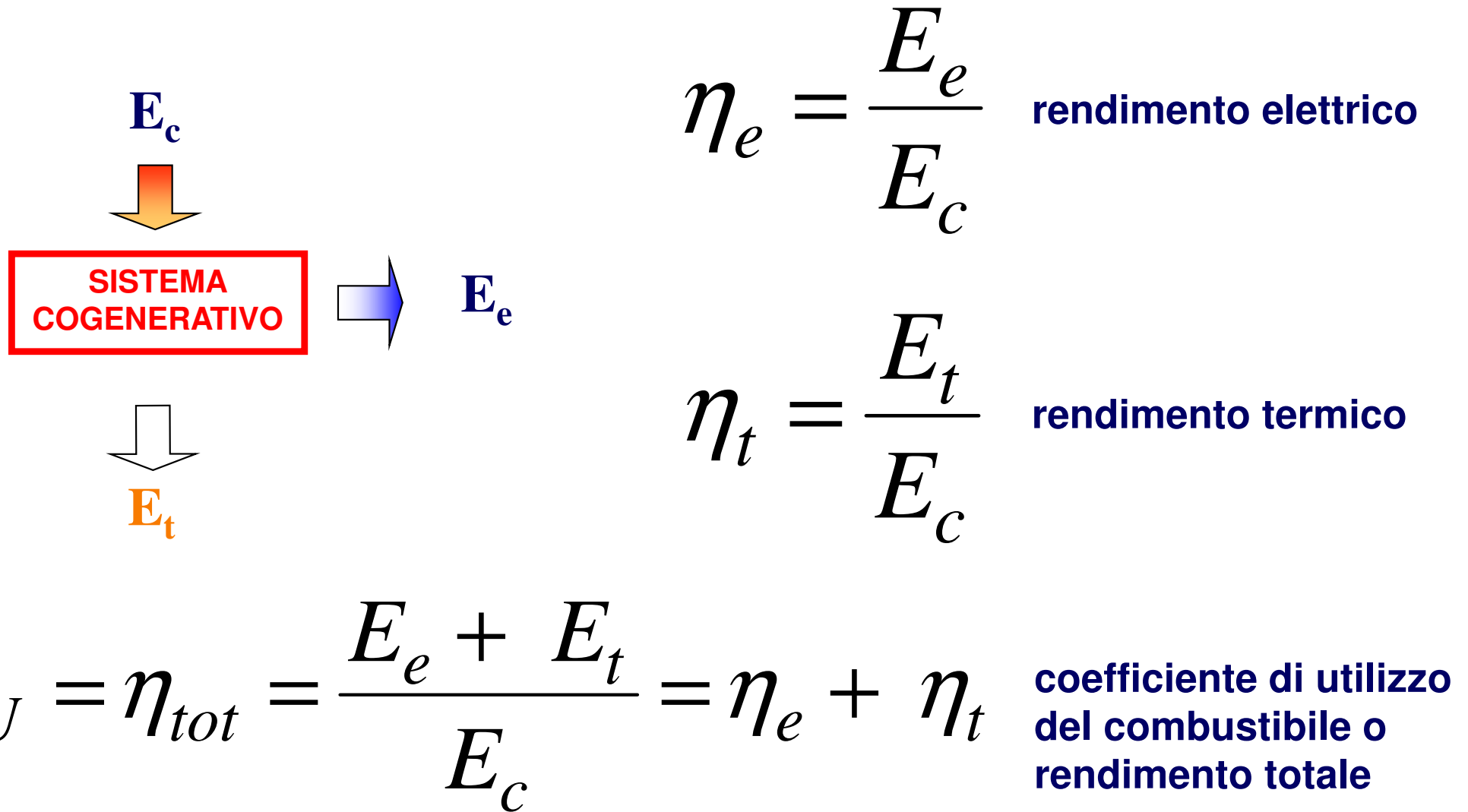


# *Le applicazioni della cogenerazione*

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

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

# 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

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

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

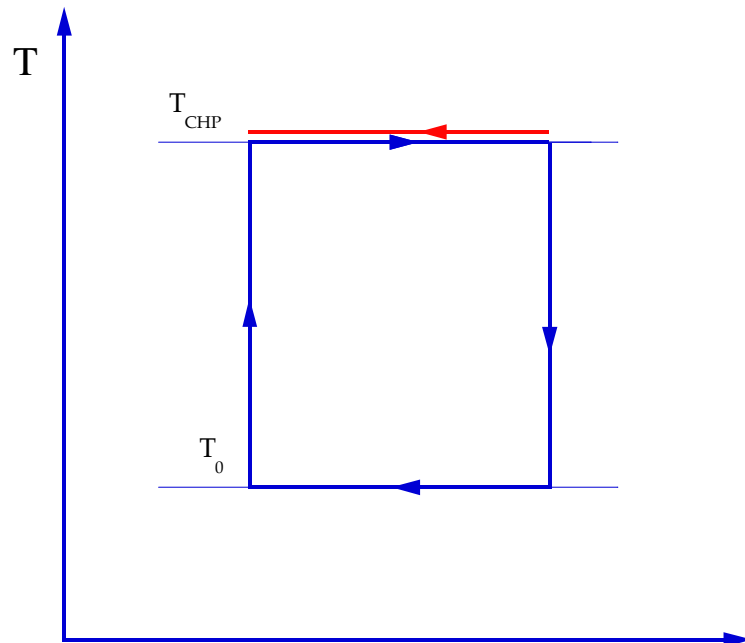
Equivalente elettrico del calore

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

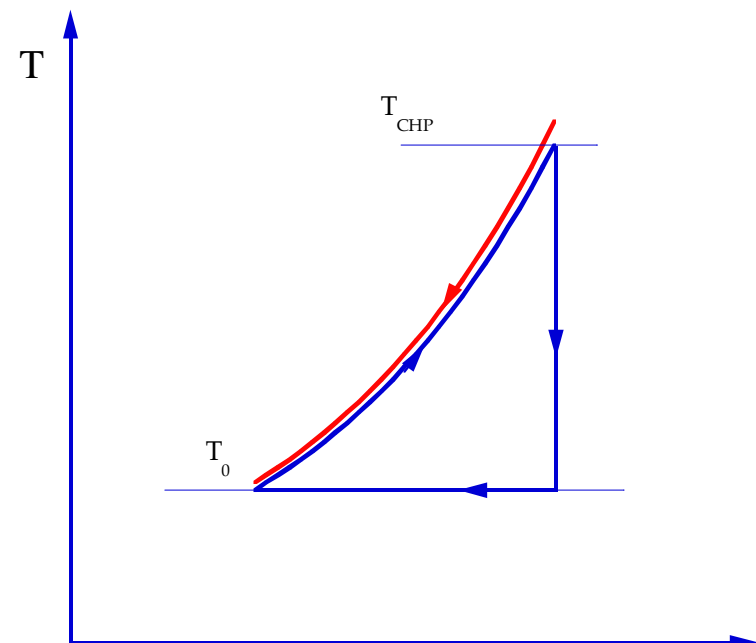
Equivalente meccanico del calore

## Il rendimento di secondo principio

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



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



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

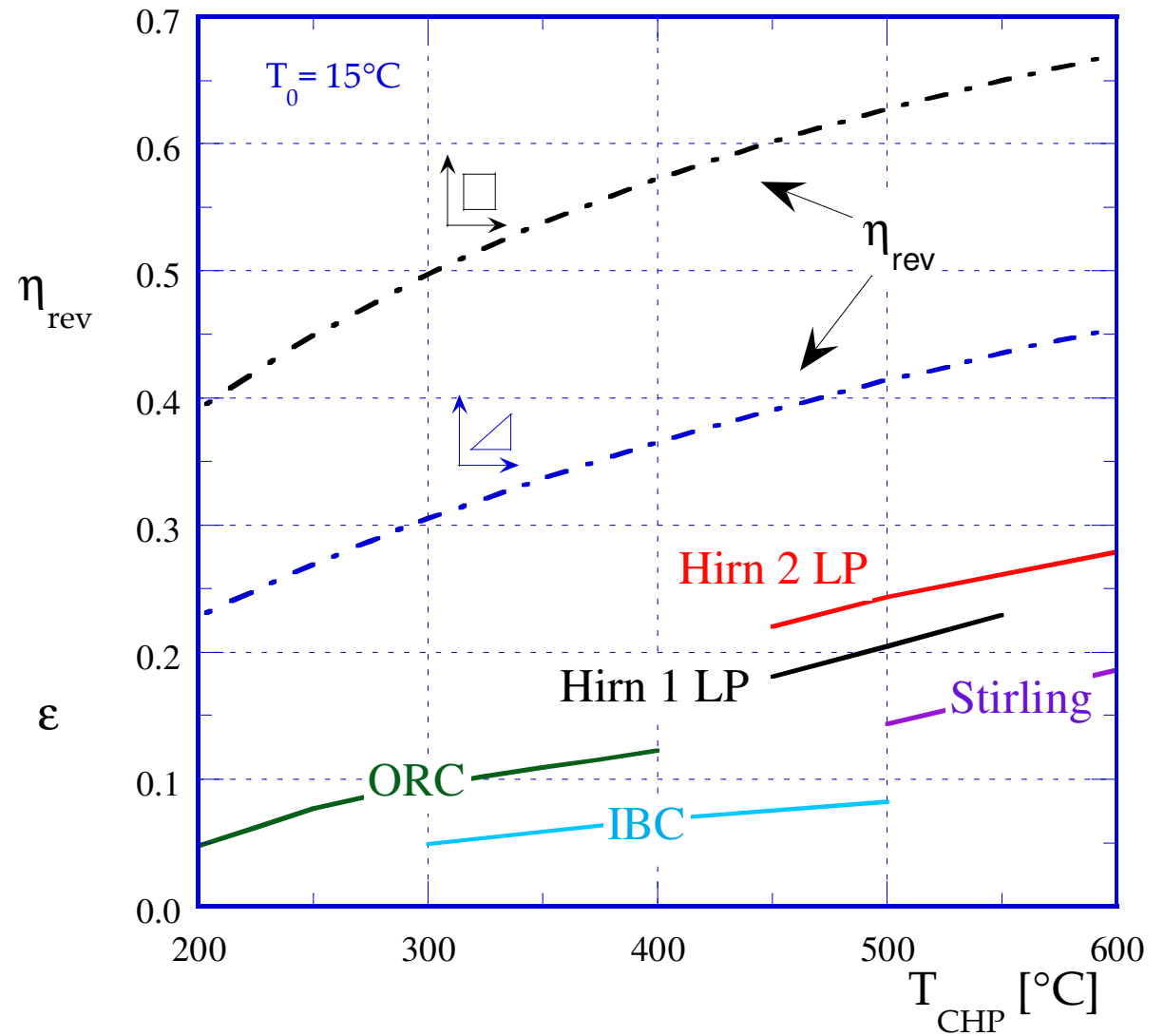
$$T_{ml,CHP} = \frac{T_{CHP} - T_0}{\ln(T_{CHP}/T_0)}$$



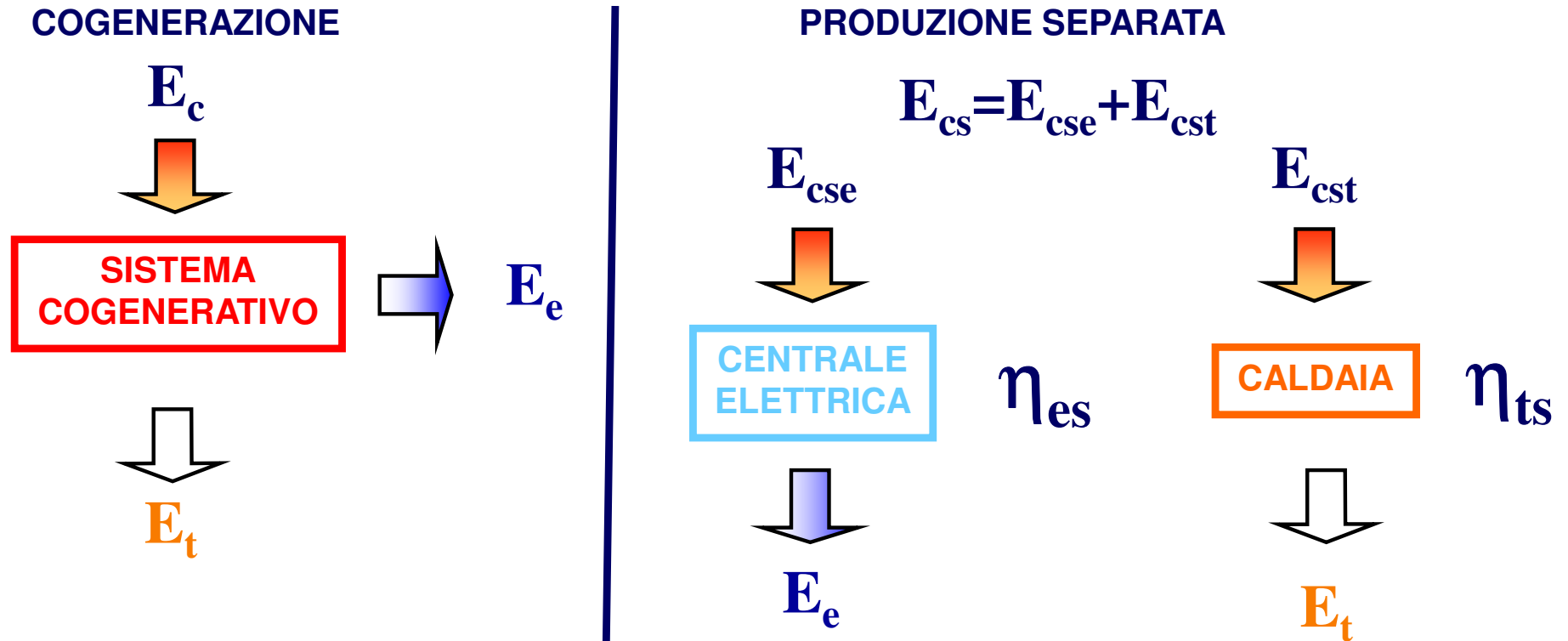
# Il rendimento di secondo principio

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

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



# 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

