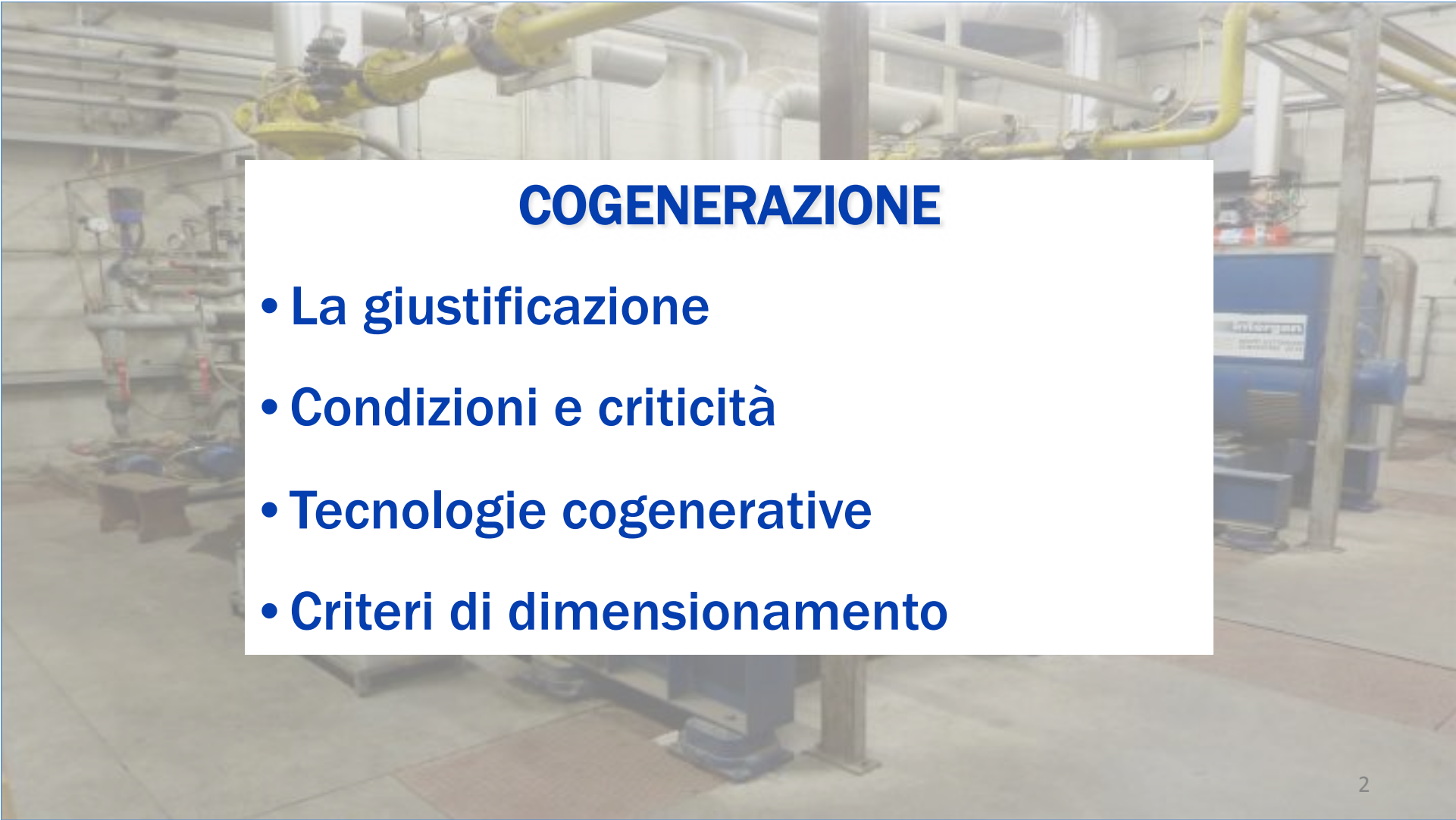


PRINCIPALI SOLUZIONI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA NELL'INDUSTRIA

Nino Di Franco
EGE Secem
Università di Pavia



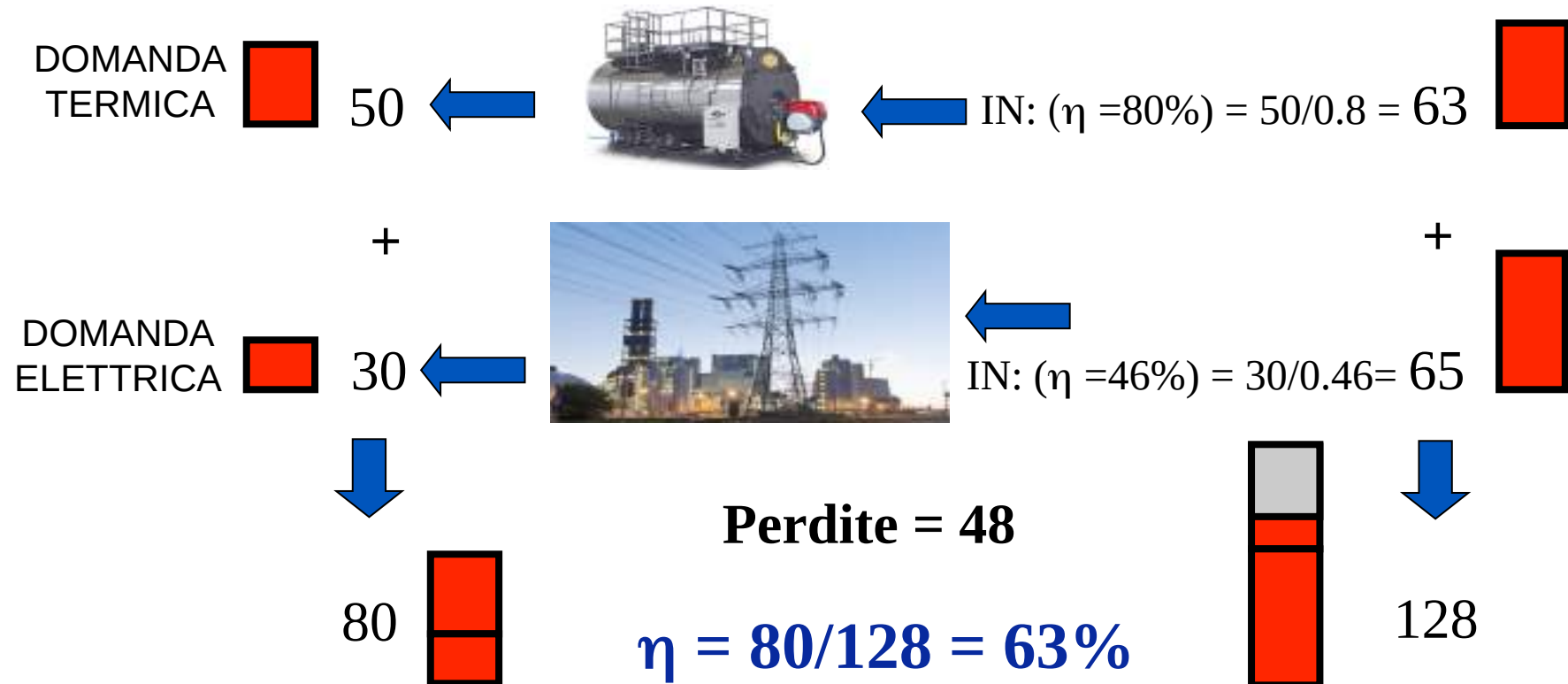
Corso per EGE ed Energy Manager
Roma, 18 aprile 2024

The background of the slide is a photograph of an industrial cogeneration plant. It shows a complex network of white and yellow pipes, valves, and machinery. In the foreground, there are blue structural supports and a large blue piece of equipment on the right side. The overall scene is a typical industrial setting for energy production.

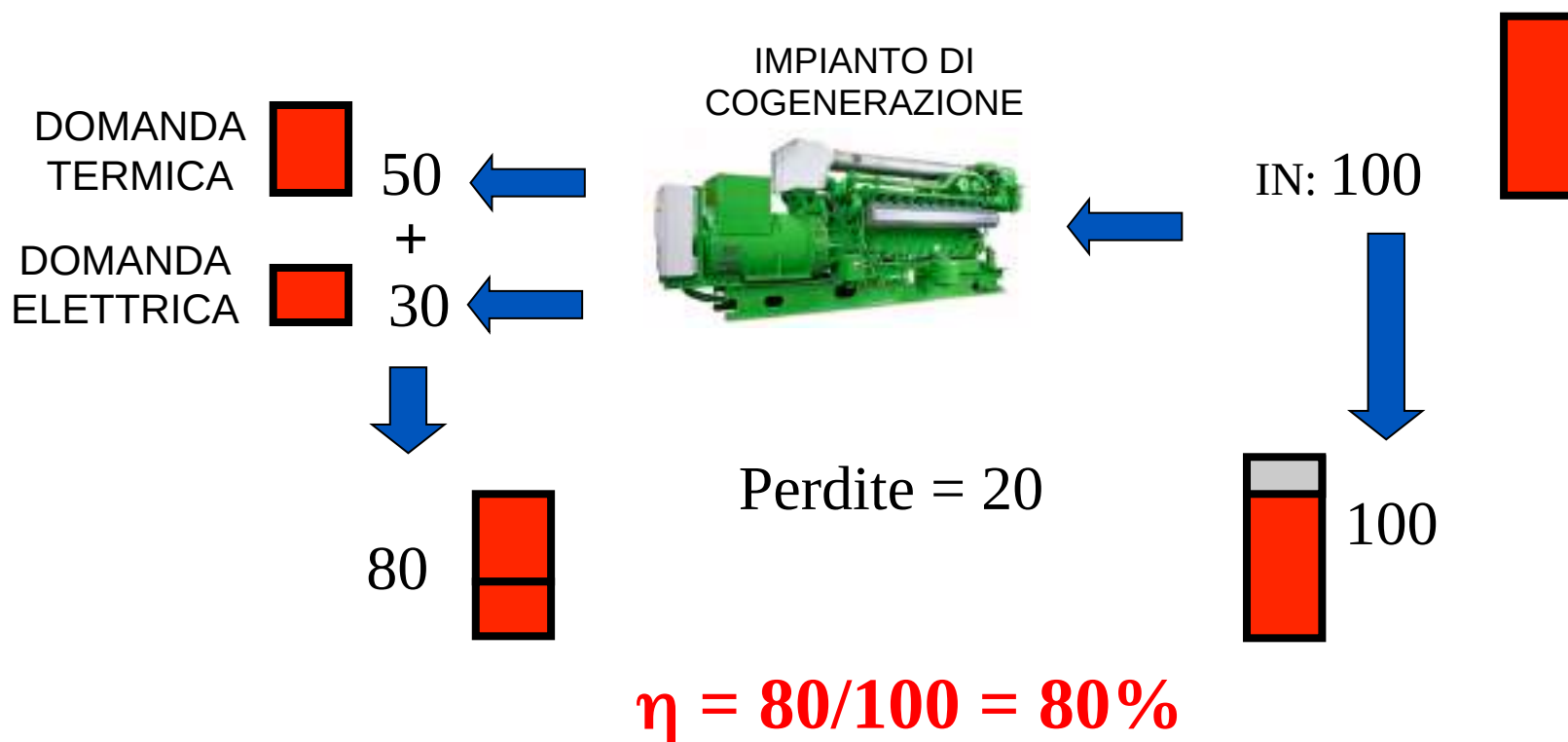
COGENERAZIONE

- **La giustificazione**
- **Condizioni e criticità**
- **Tecnologie cogenerative**
- **Criteri di dimensionamento**

A) PRODUZIONE SEPARATA DI ELETTRICITÀ E CALORE (numeri in unità energetiche)



B) PRODUZIONE COMBINATA DI ELETTRICITÀ E CALORE (numeri in unità energetiche)



L' ADOZIONE DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE RICHIEDE IL RISPETTO DI PRECISE CONDIZIONI TECNICO-GESTIONALI:

- 1) Domanda di calore a **bassa temperatura** (vapore a bassa pressione, acqua calda, cicli ad assorbimento)
- 2) Domanda di **elettricità**
- 3) Una sufficiente **contemporaneità** tra tali domande
- 4) 'Importanti' **dimensioni** di tali domande
- 5) Un dato **rapporto** tra tali domande
- 6) **Molte ore** di domanda all'anno

CONTROINDICAZIONI PER LA COGENERAZIONE

- 1) Gli **investimenti** sono in genere **molto elevati**, con tempi di ritorno raramente sotto i 3 anni
- 2) Introduzione di elementi di **rigidità** nella gestione energetica

Indice elettrico di una macchina cogenerativa

$$I_e = \frac{E_{cog}}{Q_{cog}}$$

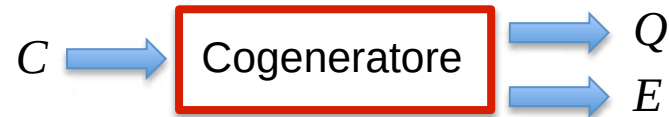
- ❖ È un numero adimensionale [MW_e/MW_t].
- ❖ L'indice elettrico è una caratteristica 'fredda' della macchina; non è un indicatore di efficienza.
- ❖ Stabilito il rapporto elettricità/calore E/Q richiesto dall'utenza, verrà individuata sul mercato una macchina che abbia un *proprio* indice elettrico il più possibile prossimo a E/Q .
- ❖ In tal maniera viene minimizzata la quantità di energia finale prelevata per via convenzionale massimizzando il flusso di cassa e il conseguente VAN.

Definiti:

Consumo: C [kWh_{primari}]

Produzione: Q [kWh_{termici}]

E [kWh_{elettrici}]



→ determinare la differenza tra il consumo per produzione separata e il consumo in cogenerazione, rispetto al consumo per produzione separata.

Consumo cogeneratore

Consumo p.s.

$$D = \frac{\frac{Q}{\eta_t} + \frac{E}{\eta_e} - C}{\frac{Q}{\eta_t} + \frac{E}{\eta_e}}$$

$$D = 1 - \frac{1}{\frac{Q}{C} \frac{1}{\eta_t} + \frac{E}{C} \frac{1}{\eta_e}}$$

Il **PES** (Primary Energy Saving) è un indice introdotto dalla Direttiva sulla cogenerazione 2004/8/EC (recepita da DM Sviluppo Economico del 5/9/2011), sulla base del quale sono calcolati incentivi concessi ad impianti di cogenerazione. Il PES è definito:

$$\text{PES} = \left(1 - \frac{1}{\frac{[\text{CHP } H\eta]}{[\text{Ref } H\eta]} + \frac{[\text{CHP } E\eta]}{[\text{Ref } E\eta]}} \right) \times 100\%$$

CHP $H\eta$ è il rendimento termico del cogeneratore, rapporto tra calore utile ed energia del combustibile;

CHP $E\eta$ è il rendimento elettrico del cogeneratore, rapporto tra energia elettrica cogenerata ed energia del combustibile;

Ref $H\eta$ è il rendimento termico di riferimento per la produzione separata di elettricità e calore;

Ref $E\eta$ è il rendimento elettrico di riferimento per la produzione separata di elettricità e calore.

Ref $H\eta$ e Ref $E\eta$ sono valori fissati dalla Direttiva.

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{CHP \ H\eta}{Ref \ H\eta} + \frac{CHP \ E\eta}{Ref \ E\eta}} \right) \times 100\%$$

=

$$D = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{e,cog}}{\eta_e} + \frac{\eta_{t,cog}}{\eta_t}}$$

In Italia, la cogenerazione viene definita “**ad alto rendimento**” (*CAR*) a seconda dei risparmi di energia effettivamente conseguiti.

- Se l'impianto ha una capacità uguale o maggiore a 1 MWe
→ PES > 10%.
- Se l'impianto ha una capacità inferiore a 1 MWe
→ PES > 0

COGENERAZIONE AD ALTO RENDIMENTO: INCENTIVI

- Accesso ai **titoli di efficienza energetica** (certificati bianchi)
- Speciali **agevolazioni fiscali** sull'accisa del gas naturale usato per la CAR
- Possibilità di accedere al regime di **ritiro dedicato** dell'energia elettrica (l'energia elettrica può essere immessa in rete, e il GSE corrisponde al produttore un certo prezzo in €/kWh)

COGENERAZIONE AD ALTO RENDIMENTO: INCENTIVI

- Possibilità di accedere al servizio di **scambio sul posto** (si compensa l'energia elettrica immessa in rete con quella prelevata in altri momenti. Solo per CAR con potenza nominale ≤ 200 kW)
- Si può beneficiare di **condizioni tecnico-economiche semplificate** per la connessione alla rete elettrica
- Si può richiedere il rilascio della garanzia di origine
- Si può beneficiare di **procedure amministrative semplificate**

La garanzia di origine (GO)

- ✓ Le imprese di vendita sono tenute a rendere disponibili ai clienti finali la composizione del mix di fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica fornita.
- ✓ La Garanzia di Origine (GO) è una certificazione elettronica che attesta l'**origine rinnovabile** delle fonti utilizzate dagli impianti qualificati IGO.
- ✓ Per ogni MWh di energia elettrica rinnovabile immessa in rete da tali impianti, il Gestore dei Servizi Energetici (GSE) rilascia un **titolo** chiamato Garanzia di Origine, in conformità con la Direttiva 2009/28/CE.
- ✓ La GO serve per **garantire ai consumatori** che scelgono questo tipo di fornitura che l'energia consumata sia effettivamente prodotta da fonti rinnovabili e non venga commercializzata più volte.
- ✓ Una volta fornito all'utente finale il quantitativo di elettricità corrispondente a un titolo, questo viene **annullato**.



MIX ENERGETICO DELL' APPROVVIGIONAMENTO PER IL MERCATO LIBERO E MIX MEDIO NAZIONALE DELL'ENERGIA ELETTRICA IMMESSA NEL SISTEMA ELETTRICO – ANNI 2021-2022

Comunicazione ai sensi dell' art.5.3 Decreto 31 luglio 2009 del Ministero dello Sviluppo Economico.

FONTI PRIMARIE UTILIZZATE	COMPOSIZIONE DEL MIX ENERGETICO UTILIZZATO PER LA PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA VENDUTA DALL'IMPRESA		COMPOSIZIONE DEL MIX MEDIO NAZIONALE UTILIZZATO PER LA PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA IMMESSA NEL SISTEMA ELETTRICO ITALIANO	
	ANNO 2021* %	ANNO 2022** %	ANNO 2021* %	ANNO 2022** %
FONTI RINNOVABILI	42,96	46,82	42,80	36,84
CARBONE	8,14	10,25	5,03	9,43
GAS NATURALE	40,60	36,01	48,01	46,92
PRODOTTI PETROLIFERI	0,88	1,57	0,89	2,01
NUCLEARE	4,41	1,61	0,00	0,00
ALTRE FONTI	3,03	3,73	3,27	4,80

* dato consuntivo

** dato pre-consuntivo

LUCE 100% GREEN DA FONTI RINNOVABILI

L'energia elettrica che ti forniamo è attestata da "Garanzia d'Origine" ossia dalla certificazione elettronica che attesta l'origine rinnovabile delle fonti utilizzate per la produzione di energia elettrica. Ci impegniamo al rispetto della disciplina stabilita dalla delibera ARERA ARG/elt/104/11 e s.m.i.

COMPOSIZIONE DEL MIX ENERGETICO DEI CONTRATTI DI VENDITA DI ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA DA FONTI RINNOVABILI (OFFERTA VERDE)	
FONTI PRIMARIE UTILIZZATE	%
- FONTI RINNOVABILI-RINNOVABILE-IDRAULICA E OCEANICA	100,00
- CARBONE	0,00
- GAS NATURALE	0,00
- PRODOTTI PETROLIFERI	0,00
- NUCLEARE	0,00
- ALTRE FONTI	0,00

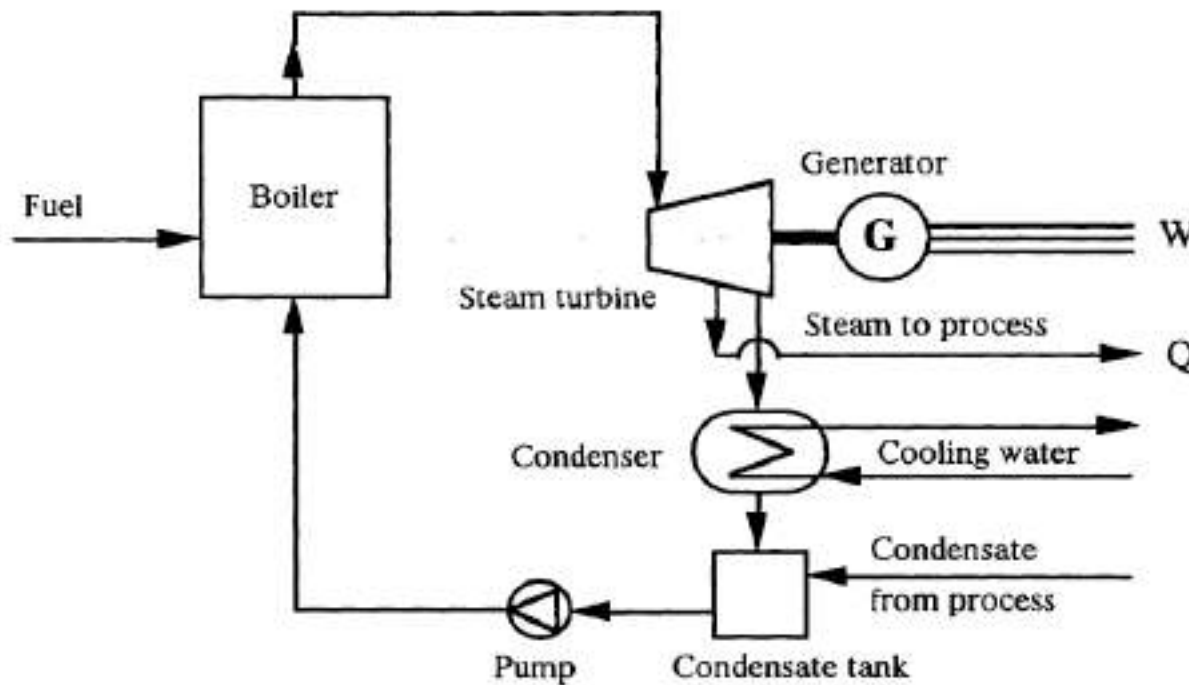


Riguardo la taglia, il D.lgs 20/2007 definisce:

- **microcogenerazione**, per unità con capacità di generazione massima **inferiore a 50 kWe**;
- **piccola cogenerazione**, per unità con capacità di generazione installata **inferiore a 1 MWe**



COGENERAZIONE CON TURBINA A VAPORE A CONDENSAZIONE E SPILLAMENTO



$$\eta_e = 30 \div 38\%$$

$$\text{INDICE ELETTRICO} = 0,1 \div 0,3$$

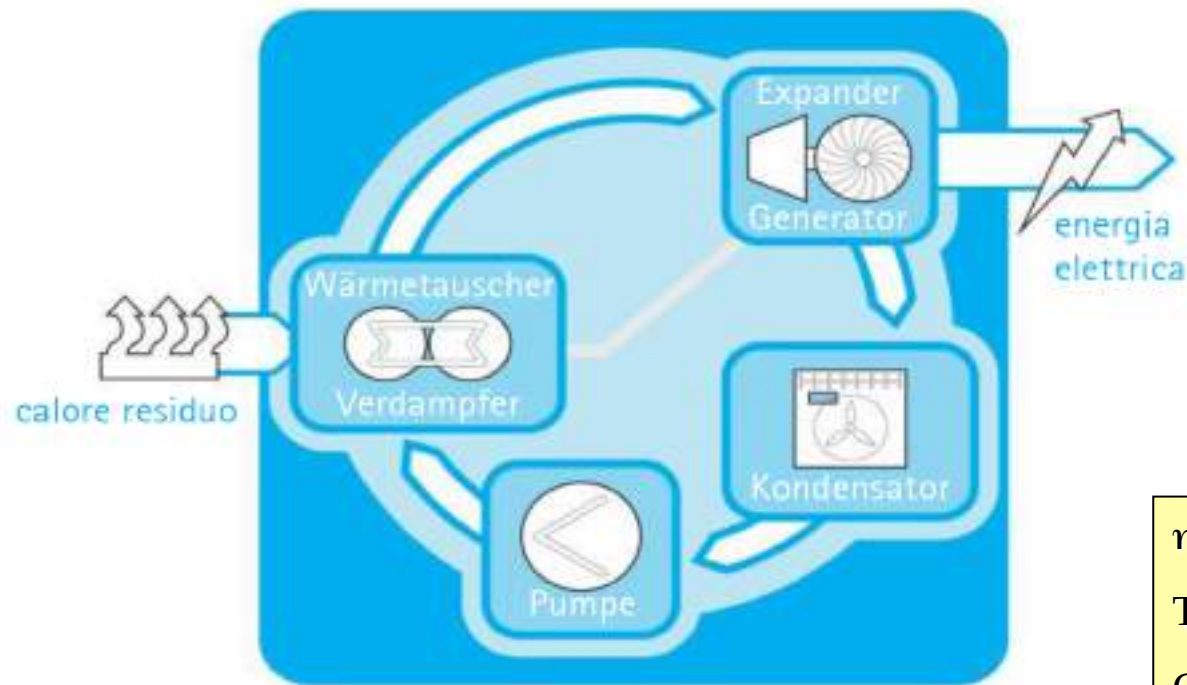
$$\text{TAGLIA} > 10 \text{ MW}$$

COMBUSTIBILE: qualunque

$$\text{COSTO: } 800 \div 1000 \text{ Eur/kW}$$

$$\text{MANUTENZIONE.: } 0,4 \text{ cEur/kWh}^{20}$$

COGENERAZIONE CON TURBINA A VAPORE A CONDENSAZIONE E SPILLAMENTO: CICLO ORC



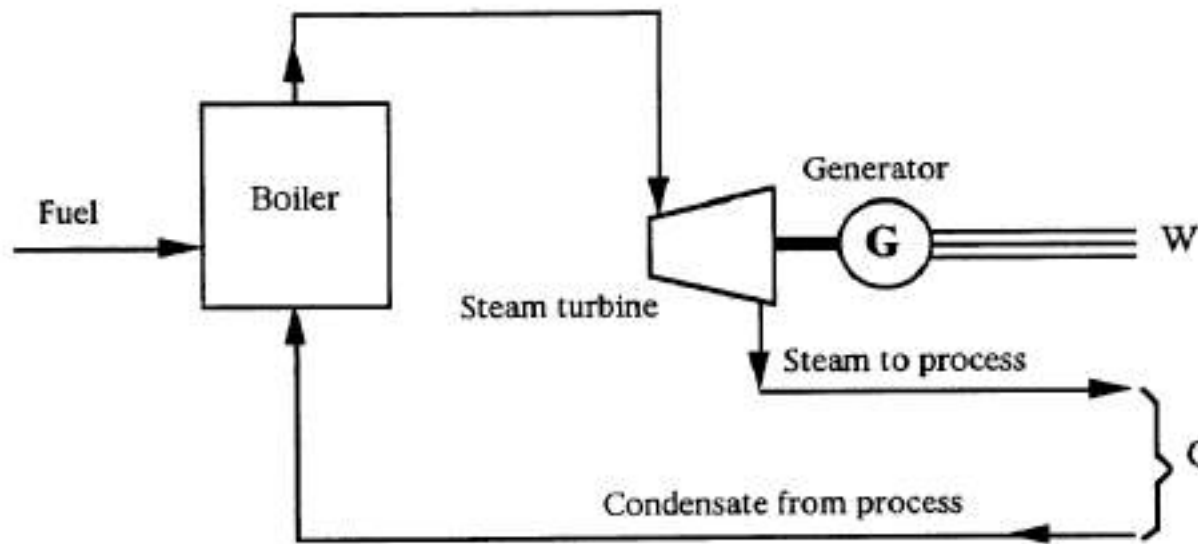
$$\eta_e = 7 \div 20\%$$

TAGLIA > 50 kW

COSTO: 900 ÷ 2500 Eur/kW

MANUTENZIONE.: 1-2 cEur/kWh²¹

COGENERAZIONE CON TURBINA A VAPORE IN CONTROPRESSIONE



$\eta_e = 15 \div 25\%$

INDICE ELETTRICO = $0,1 \div 0,25$

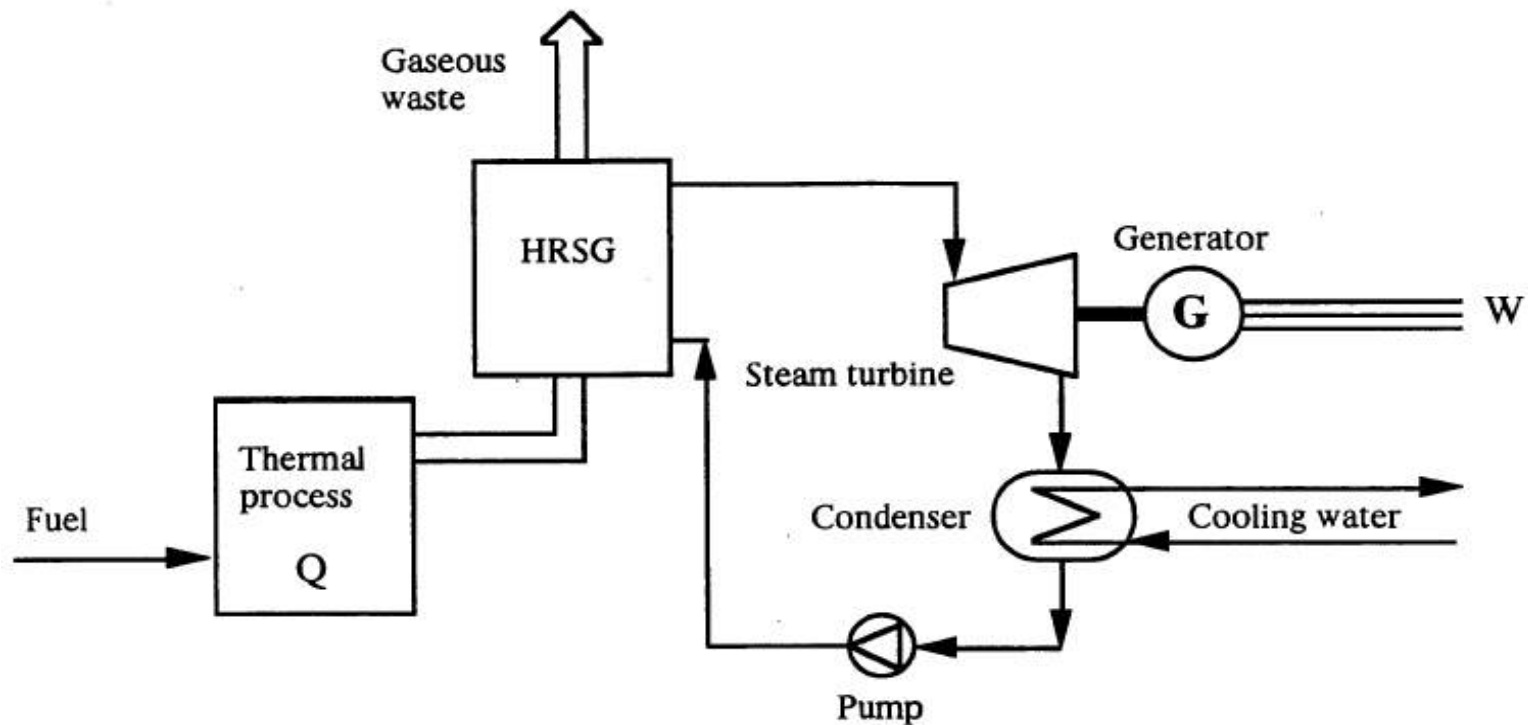
TAGLIA > 1 MW

COMBUSTIBILE: qualunque

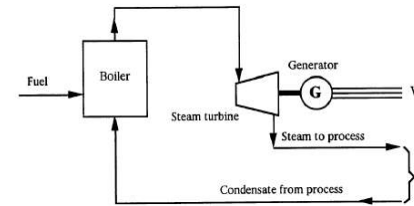
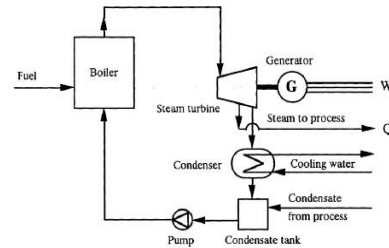
COSTO: $800 \div 1000$ Eur/kW

MANUTENZIONE.: $0,4$ cEur /kWh

COGENERAZIONE CON TURBINA A VAPORE CON CALDAIA A RECUPERO (HRSG: Heat Recovery Steam Generator)

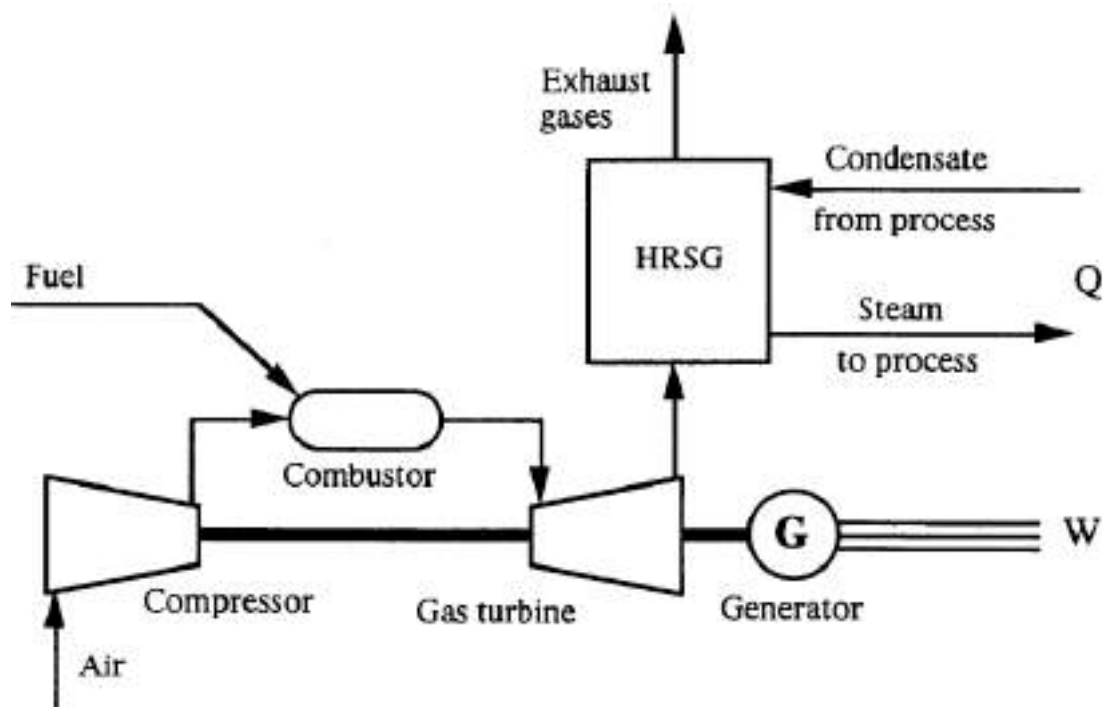


COGENERAZIONE CON TURBINE A VAPORE



VANTAGGI	SVANTAGGI
Elevata efficienza globale	Basso indice elettrico
Possibilità di usare qualunque combustibile	Elevati costi di impianto
Elevati rapporti Q/E, facilmente modulabili	Messa a regime lenta
Possibilità di erogare energia termica a diversi livelli di temperatura	
Elevata gamma di taglie disponibili	
Lunga vita utile	

COGENERAZIONE CON TURBINA A GAS A CICLO APERTO



$\eta_e = 20 \div 40\%$

INDICE ELETTRICO = $0,3 \div 0,6$

TAGLIA > 0,5 MW

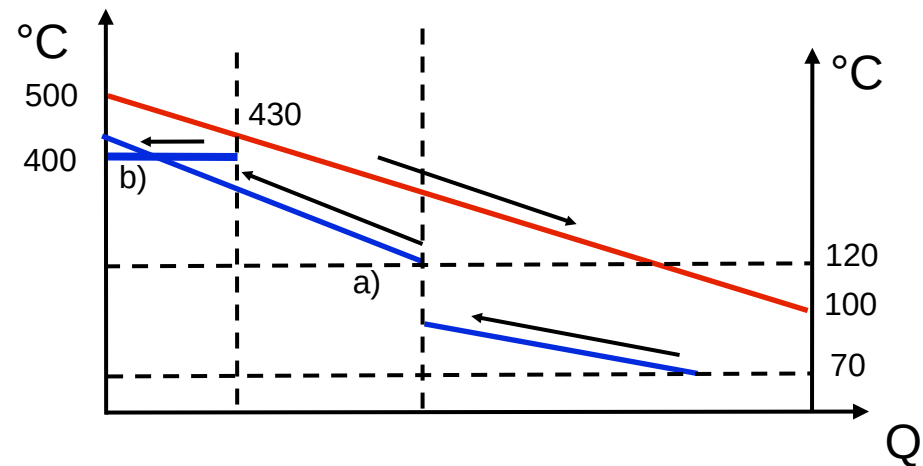
COMBUSTIBILE: gas naturale

COSTO: 1000-1300 Eur/kW

MANUTENZIONE.: 0,8 cEur /kWh

TURBOGAS - GESTIONE DEL RECUPERO TERMICO

- 1) Il calore recuperato è di tipo **sensibile**. Per poterlo sfruttare completamente sono necessarie domande a bassa e alta temperatura.



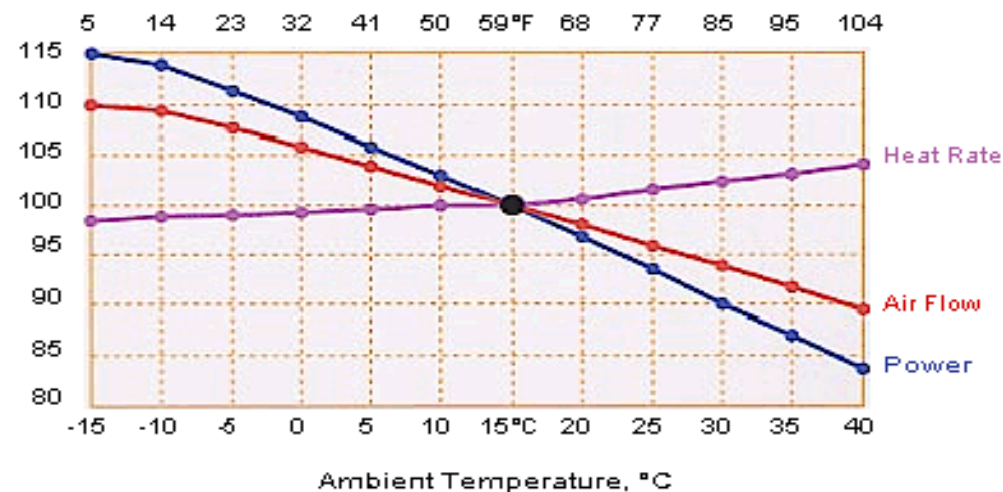
Caso a): domande di calore a temperature alte-basse: domanda **saturata**

Caso b): domanda solo ad alta temperatura, solo **una parte** della disponibilità è sfruttata

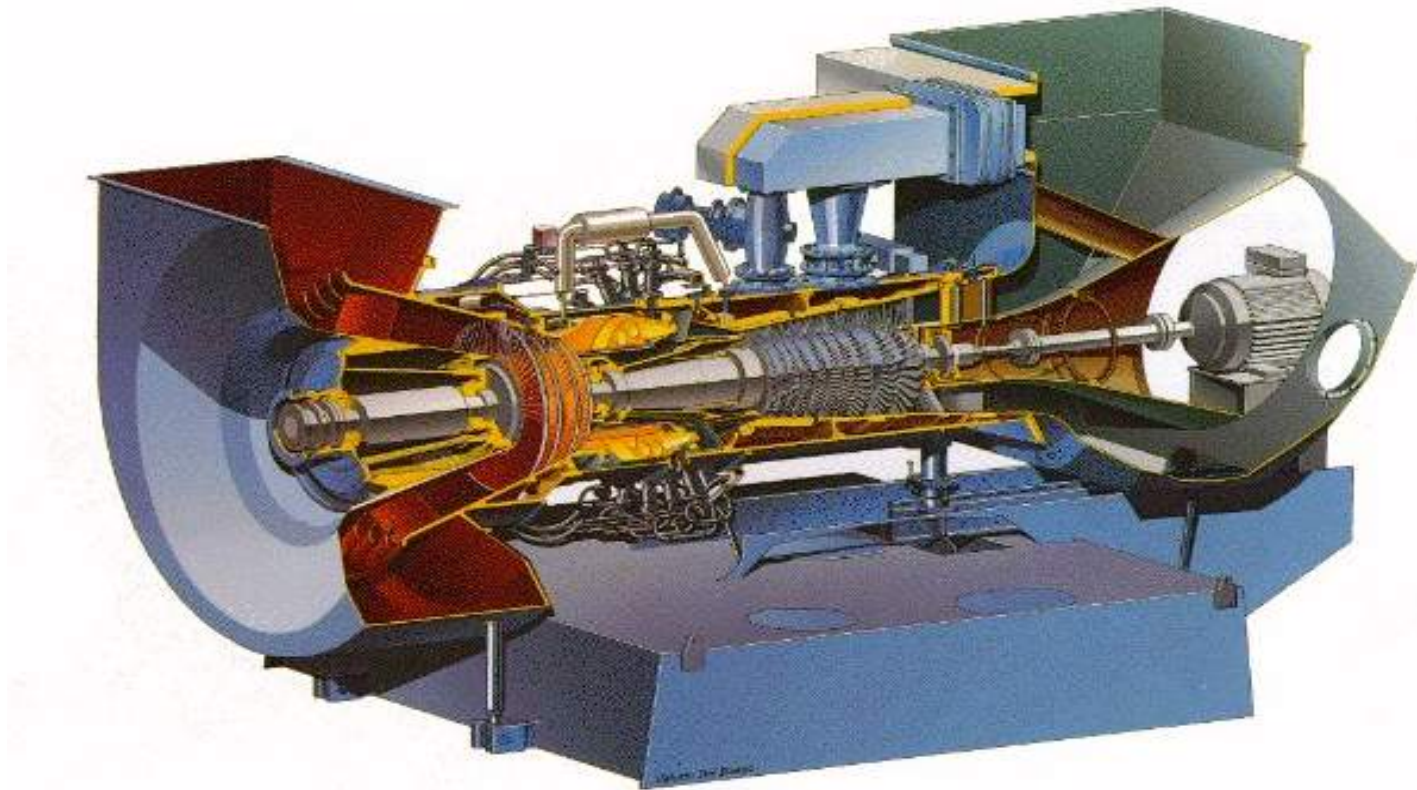
2) La temperatura ambiente e l'altezza sul livello del mare influenzano la produzione elettrica:

- ogni 10 °C superiori alla temperatura ambiente di riferimento (16 °C) il rendimento elettrico decresce dell' 8%;
- ogni 1000 m di altezza s.l.m. il rendimento decresce del 10%

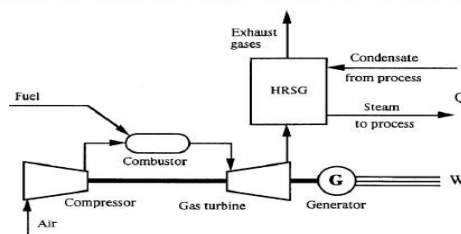
Effetto della temperatura ambiente - Turbogas Heavy-duty



25 MW Gas Turbine

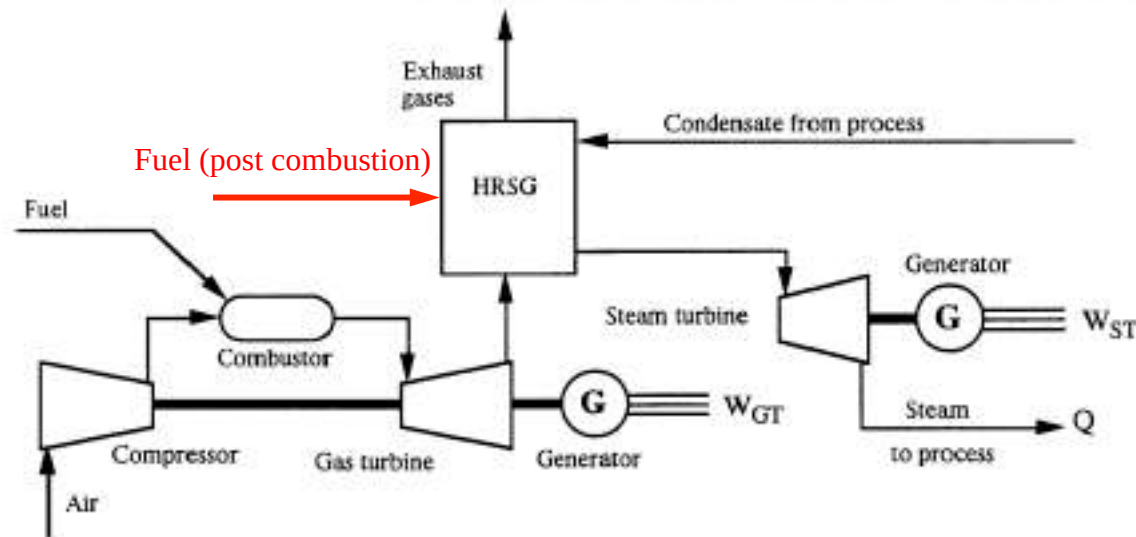


COGENERAZIONE CON TURBINA A GAS



VANTAGGI	SVANTAGGI
Disponibilità di calore ad alta temperatura	Efficienza meccanica inferiore ai motori alternativi
Grande affidabilità, lunghi periodi di impianto non presidiato	Alimentazione di gas naturale ad alta pressione
Agevole controllo dell'output elettrico	Lunghi tempi di revisione
Basso rapporto peso/ potenza	Alto livello di rumore
Non necessità di acqua di raffreddamento	Bassa efficienza ai bassi carichi
Ampia gamma di combustibili utilizzabili (gas naturale, olio combustibile, gasolio, biogas, GPL...)	La potenza elettrica decade con l'aumento di temperatura ambiente
Possibilità di alimentazione multicomcombustibile	Tempi di messa a regime medio-lunghi (da 0,5 a 2 h)
Basso livello di emissioni	
Rapporto 'costo investimento/kWe' contenuto	

COGENERAZIONE CON CICLO COMBINATO



In un turbogas, la combustione richiede **elevati eccessi d'aria (300÷400%)** per limitare gli stress termici sui primi ranghi della palettatura. I gas di scarico contengono ancora O₂ al 15÷18%, e ciò rende possibile una **postcombustione** per produrre vapore ed elettricità con una turbina a vapore.

$$\eta_e = 35 \div 55\%$$

$$\text{INDICE ELETTRICO} = 0,5 \div 2,5$$

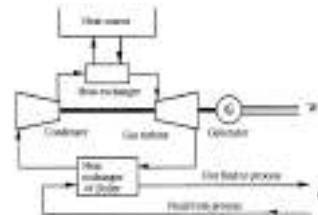
$$\text{TAGLIA} > 10 \text{ MW}$$

COMBUSTIBILE: gas naturale

COSTO: 1300 Eur/kW

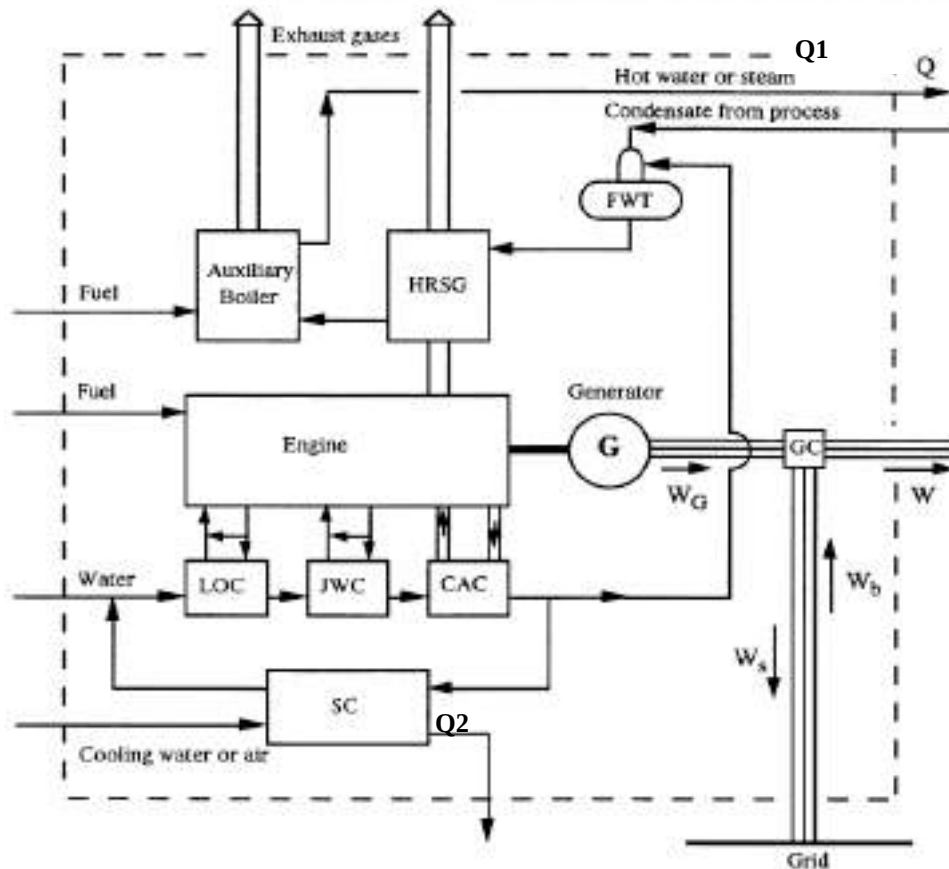
MANUTENZIONE.: 1,0 cEur/kWh

COGENERAZIONE CON CICLO COMBINATO



VANTAGGI	SVANTAGGI
Elevata produzione elettrica	Impianti di taglia elevata
	Costoso e complesso

COGENERAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA



LOC: Lubricating Oil Cooler
 JWC: Jacket Water Cooler
 CAC: Compressed Air Cooler
 FWT: Feed Water Tank

$\eta_e = 25-40\%$

INDICE ELETTRICO =
 0,8 ÷ 1,25 (recupero totale)
 1,4 ÷ 2,4 (recupero solo dal gas esausto)

TAGLIA > 0,2 MW

COMBUSTIBILE: gas naturale,
 gasolio, biogas

COSTO: 800 Eur/kW

MANUTENZIONE: 1,5 cEur/kWh

COGENERAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA



Impianto 65 kWe 110 kWt, vista interna

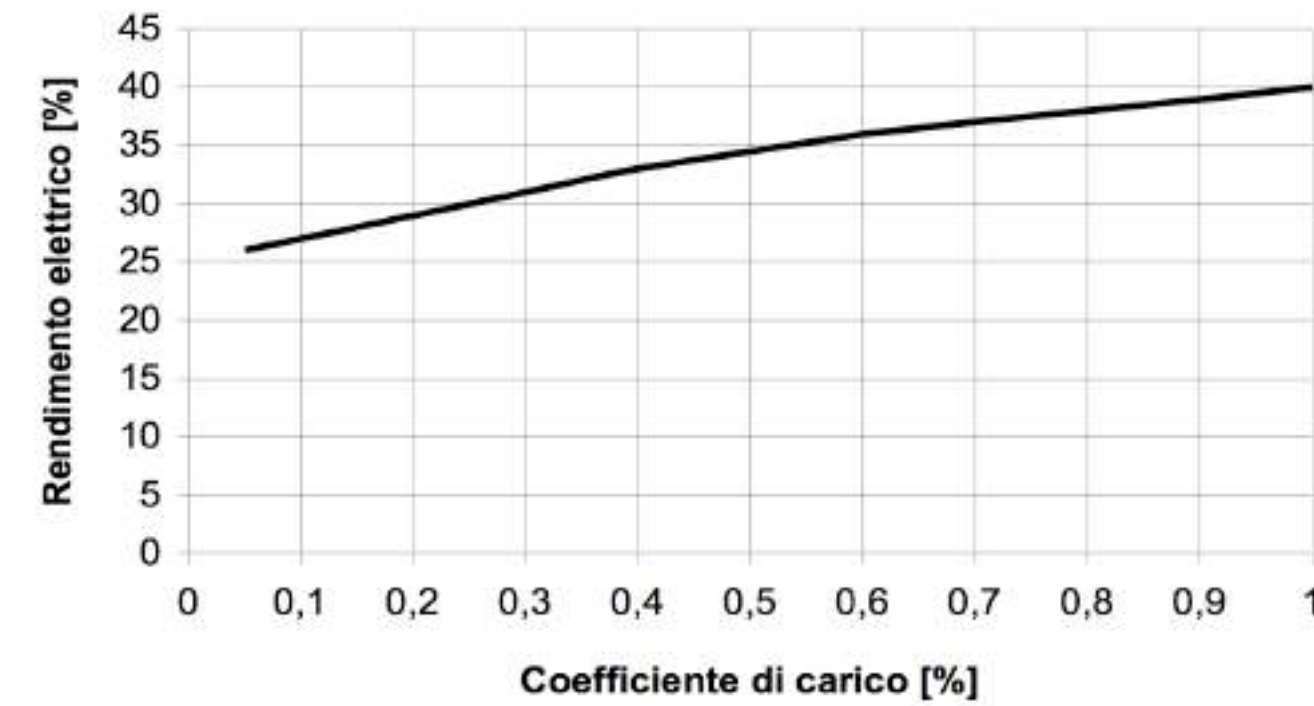
COGENERAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA



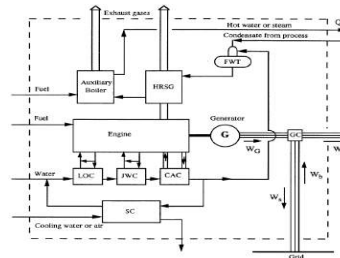
Bilancio energetico di un motore a ciclo Otto

	Energia nel combustibile [%]	Temperatura disponibile [°C]
Potenza all'asse	35	
Gas di scarico	37	500÷600 max
Acqua motore	13	80÷100
Olio	6	75÷90
Intercooler	6	60÷80
Dispersioni	3	
Totale	100	

Rendimento elettrico di motore a ciclo Otto vs carico elettrico

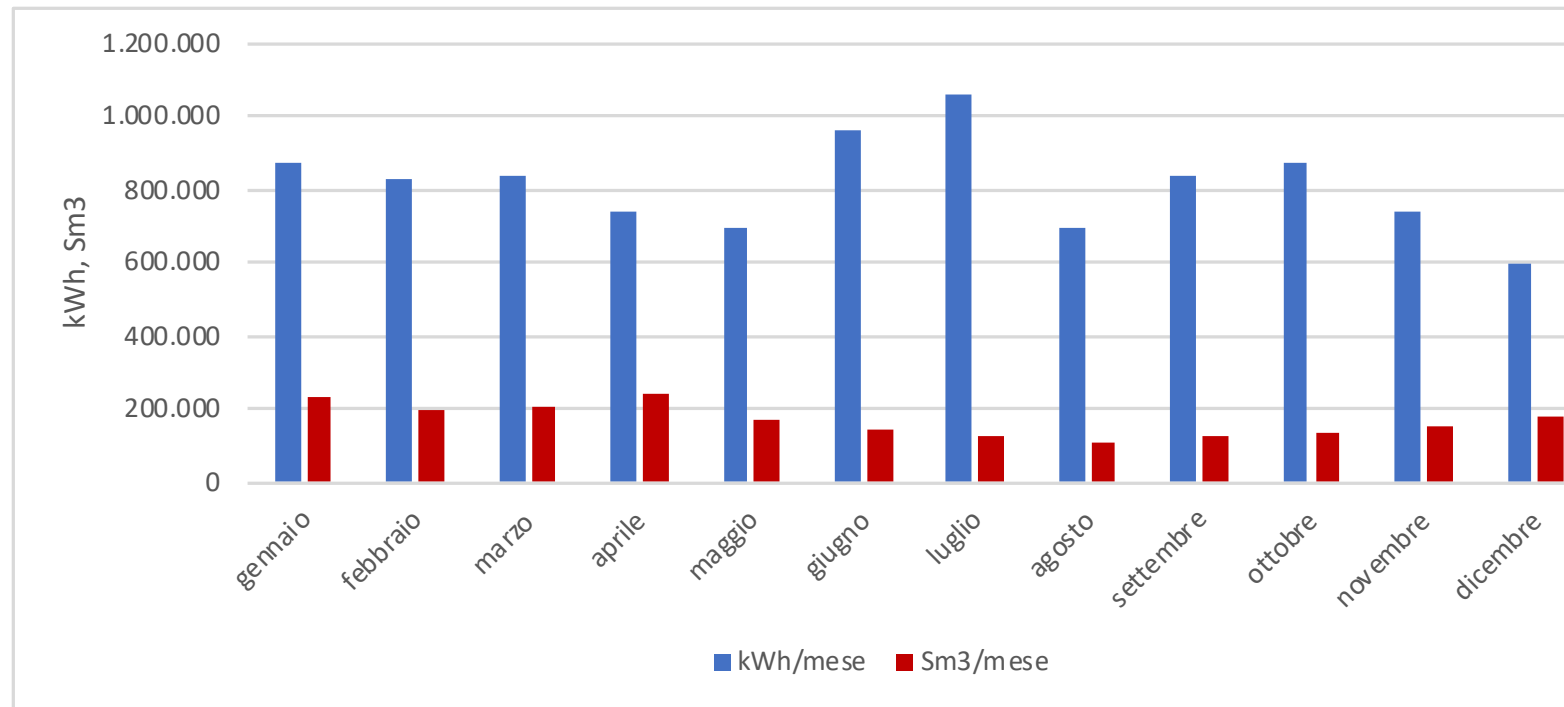


COGENERAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

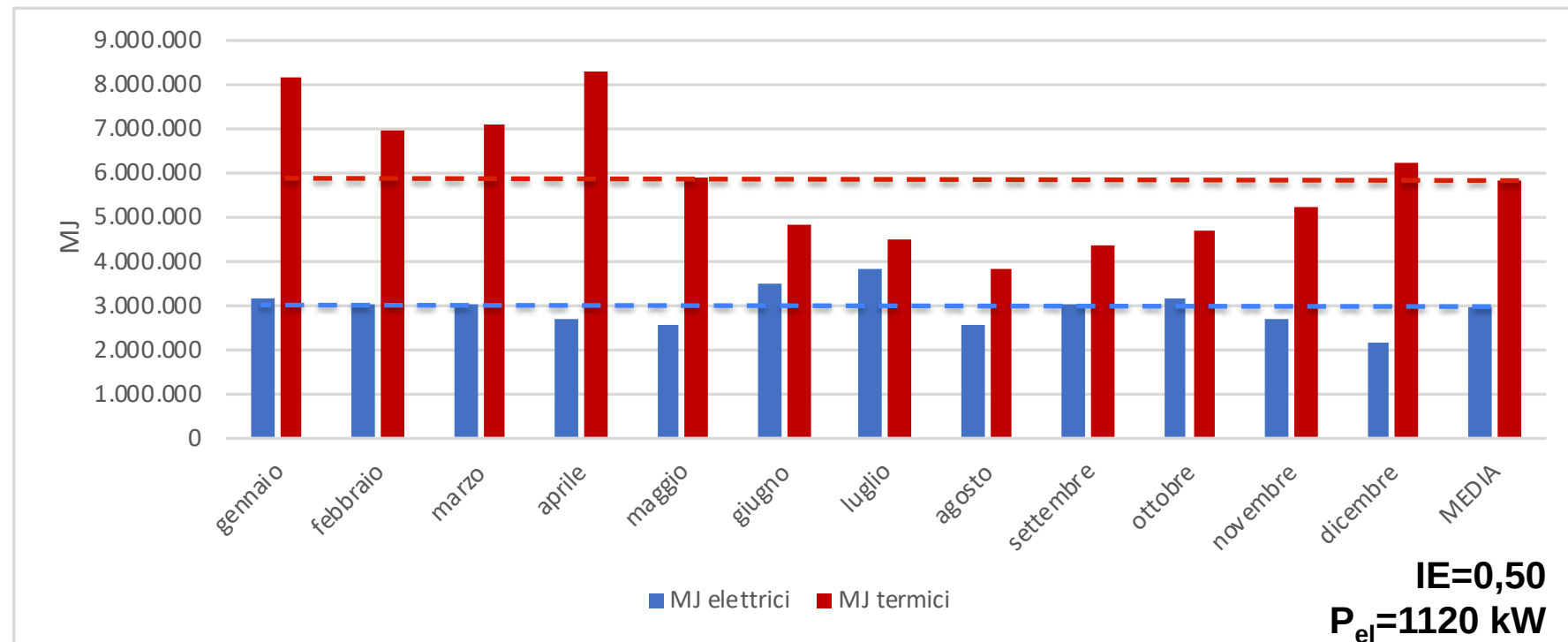


VANTAGGI	SVANTAGGI
Elevata efficienza meccanica poco variabile col carico	Necessità di raffreddamento
Investimento per kW installato contenuto	Alto rapporto peso/potenza
Ampio intervallo di potenze disponibili anche a partire da pochi kW	Alto livello di rumore
Facilità di parzializzazione del carico sempre a efficienze elevate	Necessità di fondazioni robuste
Può essere esercito in isola (come nelle applicazioni navali)	Elevati costi di manutenzione
Messa a regime veloce (a pieno carico in 15 secondi)	
Ampia gamma di combustibili, dal gas naturale all'HFO (heavy fuel oil)	
Facilità di revisione, anche <i>in situ</i> da parte di personale non specialistico	
Basso costo per motori di piccole dimensioni	
Possibilità di alimentazione con gas a bassa pressione (anche a 1 bar)	

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

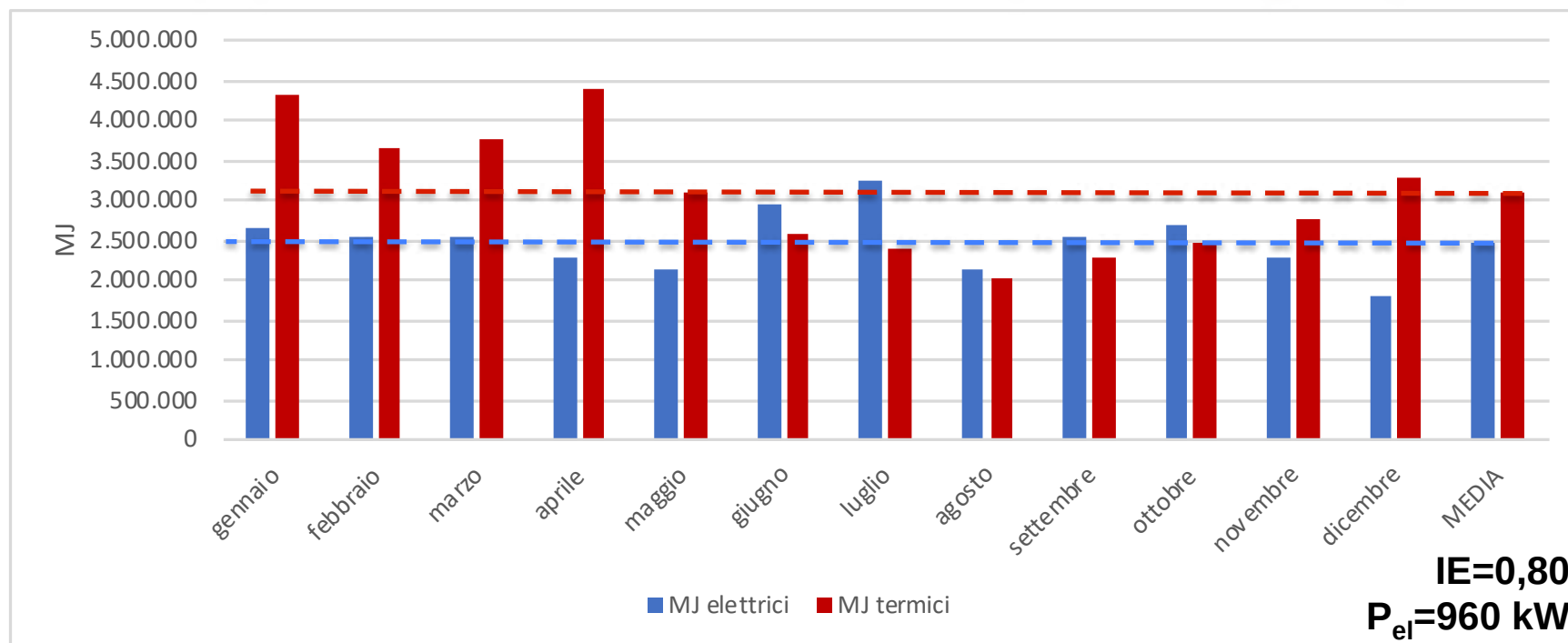


CRITERI DI DIMENSIONAMENTO



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

(dopo la realizzazione di interventi di risparmio energetico)



CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

Nel caso di un impianto di cogenerazione non è sufficiente, avendo un occhio ai diagrammi di carico termico ed elettrico, scegliere la macchina che copra la maggior parte del carico, e che al contempo massimizzi il conto economico.

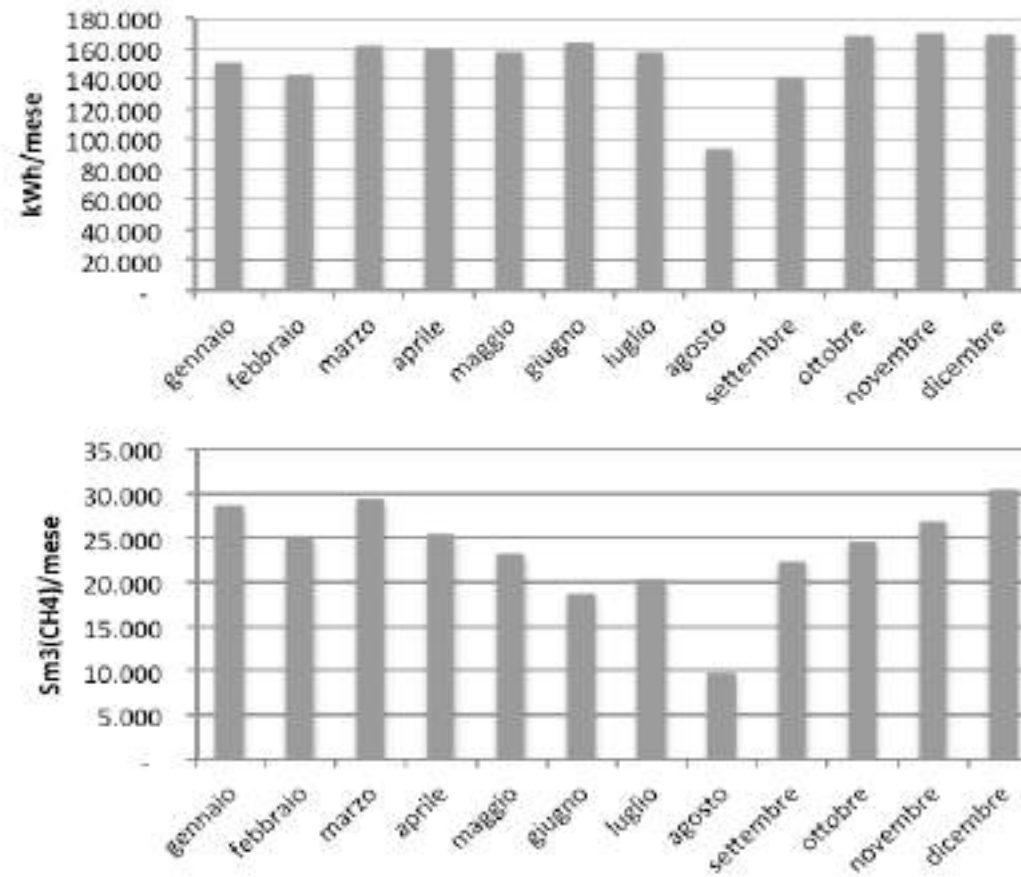
Occorre *prima* minimizzare le richieste energetiche da parte del ciclo produttivo e i servizi di stabilimento, e *poi* dimensionare il cogeneratore.

Bisogna quindi, preventivamente:

- a) *condurre una diagnosi* energetica a tappeto dello stabilimento,
- b) *individuare le opportunità* di contenimento dei consumi,
- c) *implementare fisicamente* tali opportunità, per ridurre di conseguenza i consumi energetici in corrispondenza di uno scenario produttivo (sperabilmente) stabile nell'arco degli anni futuri.

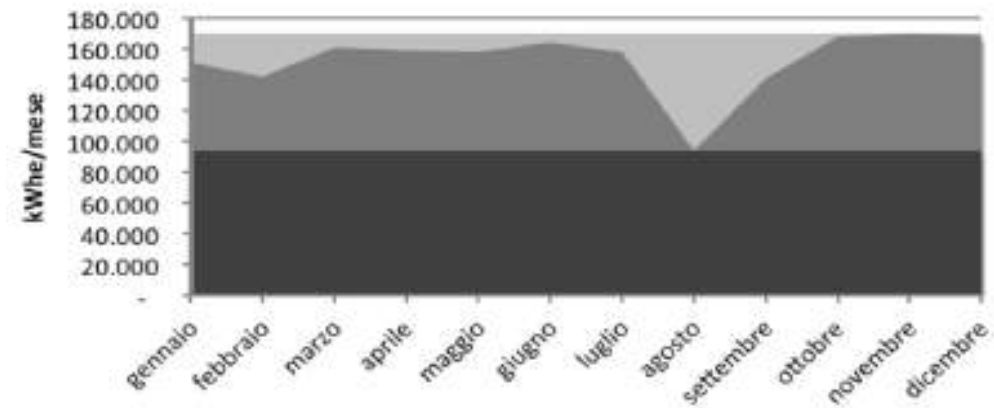
Su *questo* scenario va collocato il cogeneratore, con la sua produzione elettrica e termica.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

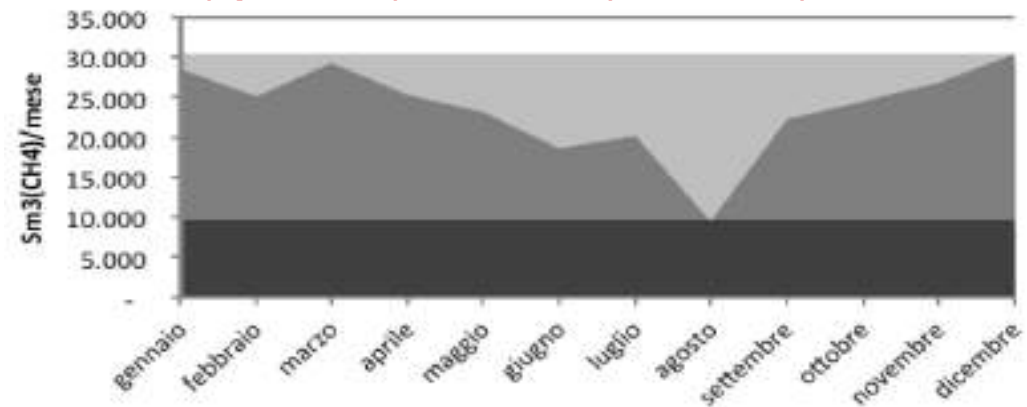


ESEMPIO DI PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO

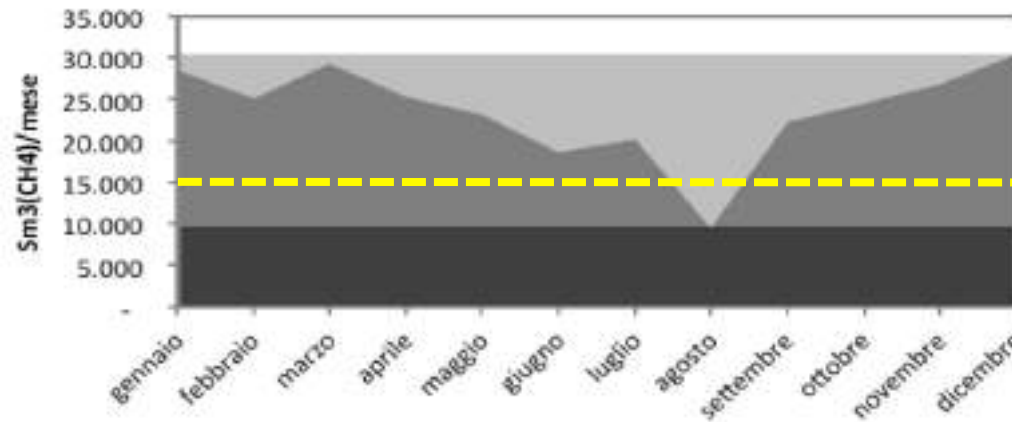
Prelievi elettrici (spezzata)+massimi/minimi (fasce orizzontali)



Prelievi termici (spezzata)+massimi/minimi (fasce orizzontali)



Prelievi termici (spezzata)+massimi/minimi (fasce orizzontali)



Potenza termica minima

$$\frac{10.000 \left[Sm^3 \right] \times 34.500 \left[\frac{kJ}{Sm^3} \right]}{30gg \times 24 \frac{h}{gg} \times 3600 \frac{sec}{h}} = 133 \text{ kW}$$

Potenza termica massima

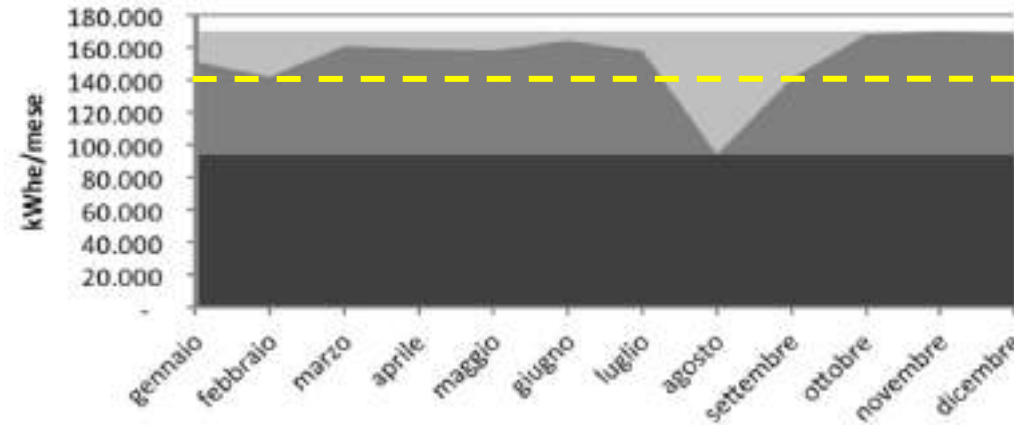
$$\frac{30.000 \left[Sm^3 \right] \times 34.500 \left[\frac{kJ}{Sm^3} \right]}{30gg \times 24 \frac{h}{gg} \times 3600 \frac{sec}{h}} = 400 \text{ kW}$$

Metà Potenza termica max

$$\frac{15.000 \left[Sm^3 \right] \times 34.500 \left[\frac{kJ}{Sm^3} \right]}{30gg \times 24 \frac{h}{gg} \times 3600 \frac{sec}{h}} = 200 \text{ kW}$$

Come regola di prima approssimazione, il dimensionamento di un impianto di cogenerazione si realizza **su base termica**, installando circa la **metà della potenzialità termica massima** domandata nell'anno.

Prelievi elettrici (spezzata)+massimi/minimi (fasce orizzontali)

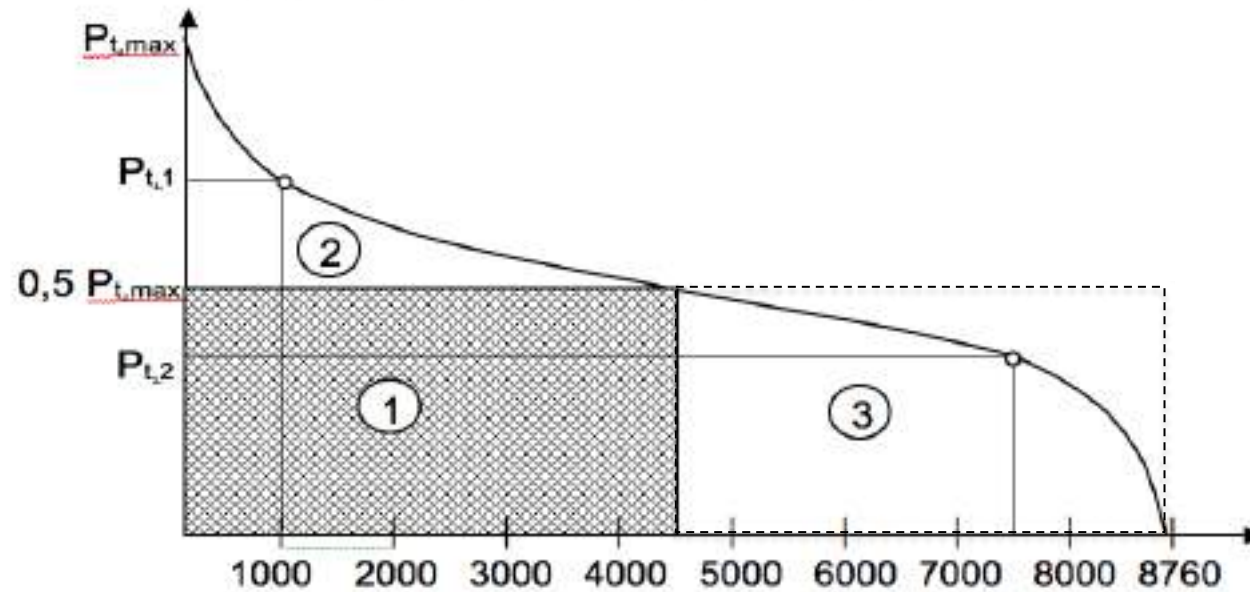


Una macchina da 200 kW termici con indice elettrico $I_e=1$ produce in continuo **200 kW_e**.

Questi corrispondono a **140.000 kWh_e/mese**, capaci di soddisfare la richiesta elettrica 11 mesi su 12.

La macchina cogenerativa sarà un **motore endotermico** a recupero integrale.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

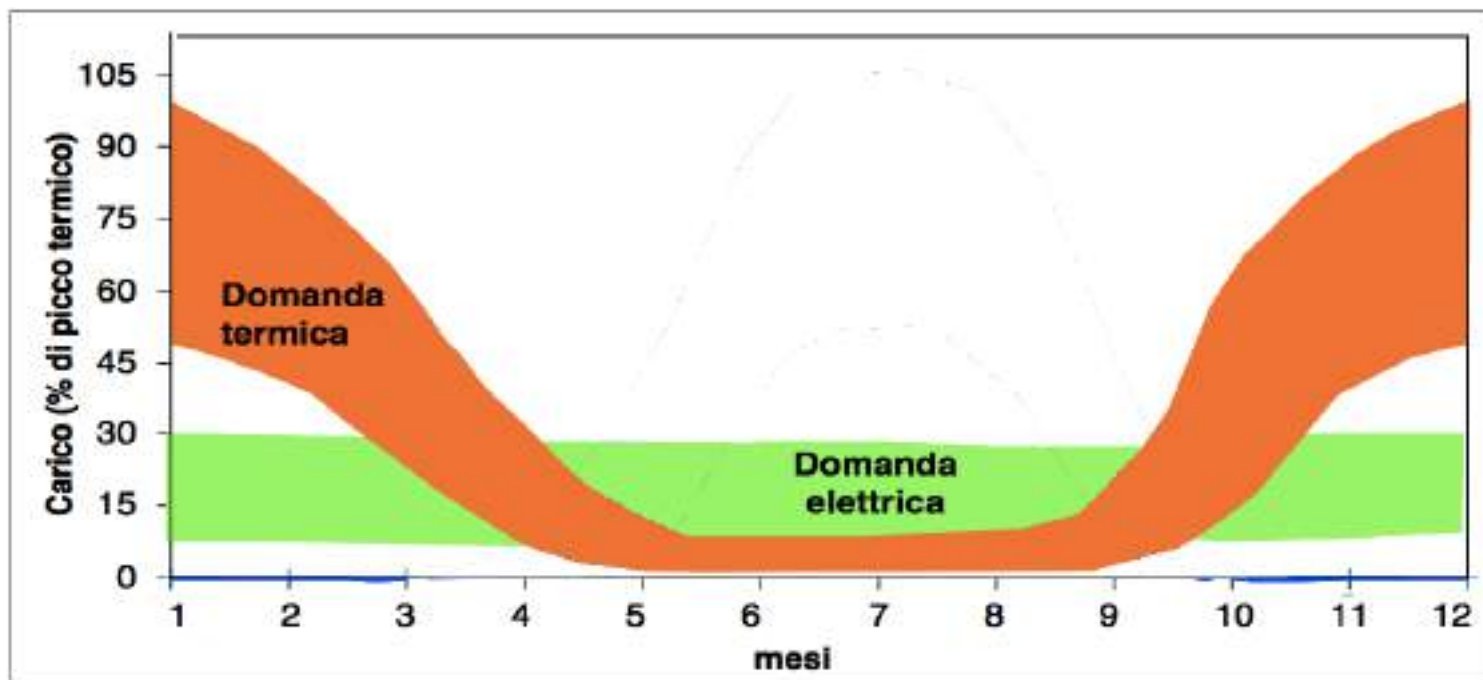


- ① fornita integralmente dal cogeneratore funzionante al 100% del carico
- ③ fornita dal cogeneratore funzionante a carico parziale: area ③ /
- ② fornita da altri generatori

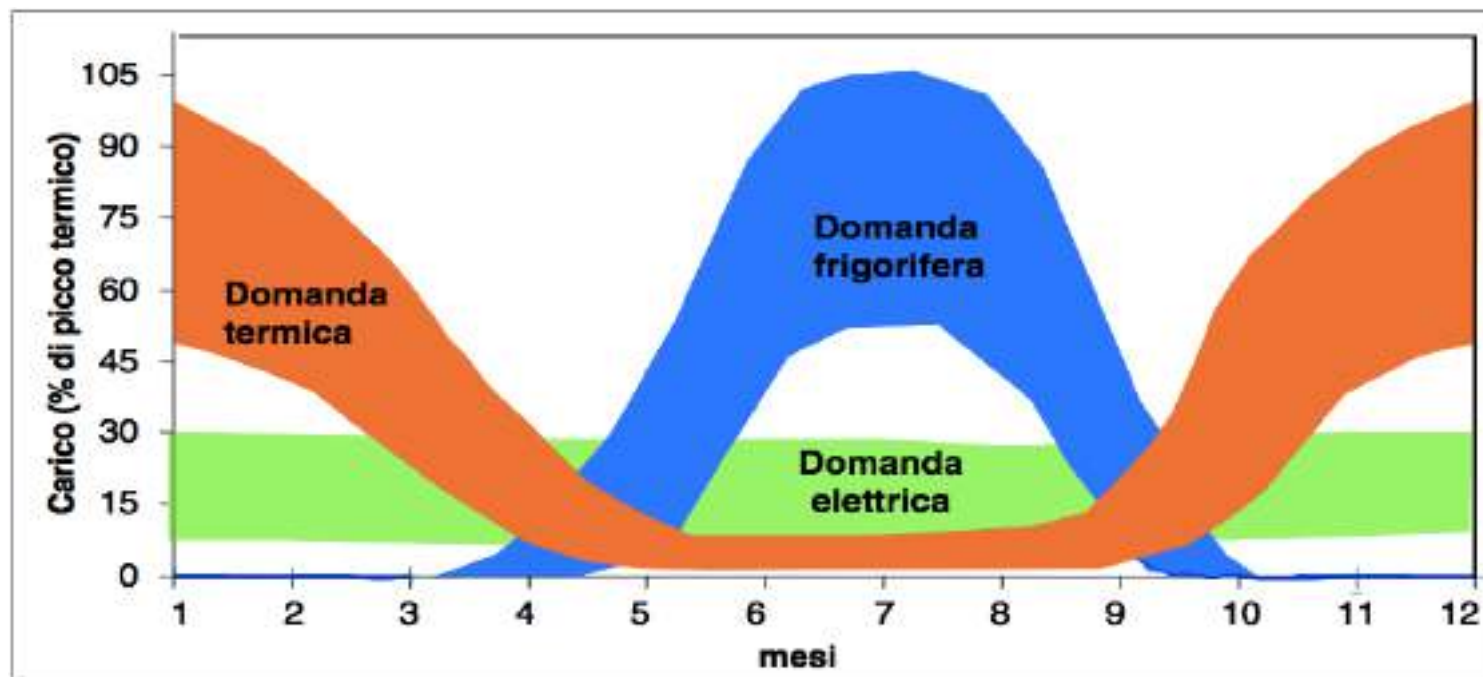
CAMPI DI APPLICAZIONE DELLE DIVERSE TECNICHE COGENERATIVE

Macchina da cogenerazione	IE
Turbine a vapore condensazione e spillamento	0,1÷0,5
Turbine a vapore in contropressione	0,1÷0,25
Turbina a gas a ciclo semplice	0,6÷1,1
Microturbine a gas	0,5÷0,7
Ciclo combinato	0,5÷2,5
Motore endotermico recupero integrale	0,8÷1,25
Motore endotermico recupero solo su gas	1,4÷2,4

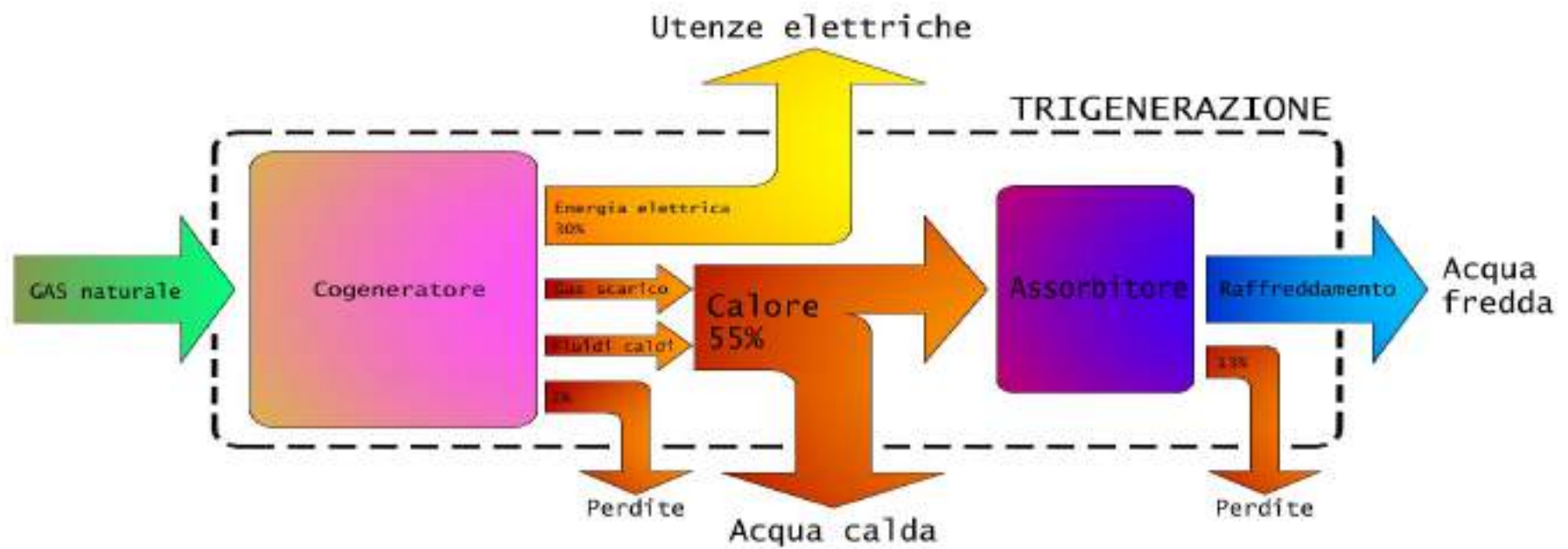
TRIGENERAZIONE



TRIGENERAZIONE



TRIGENERAZIONE

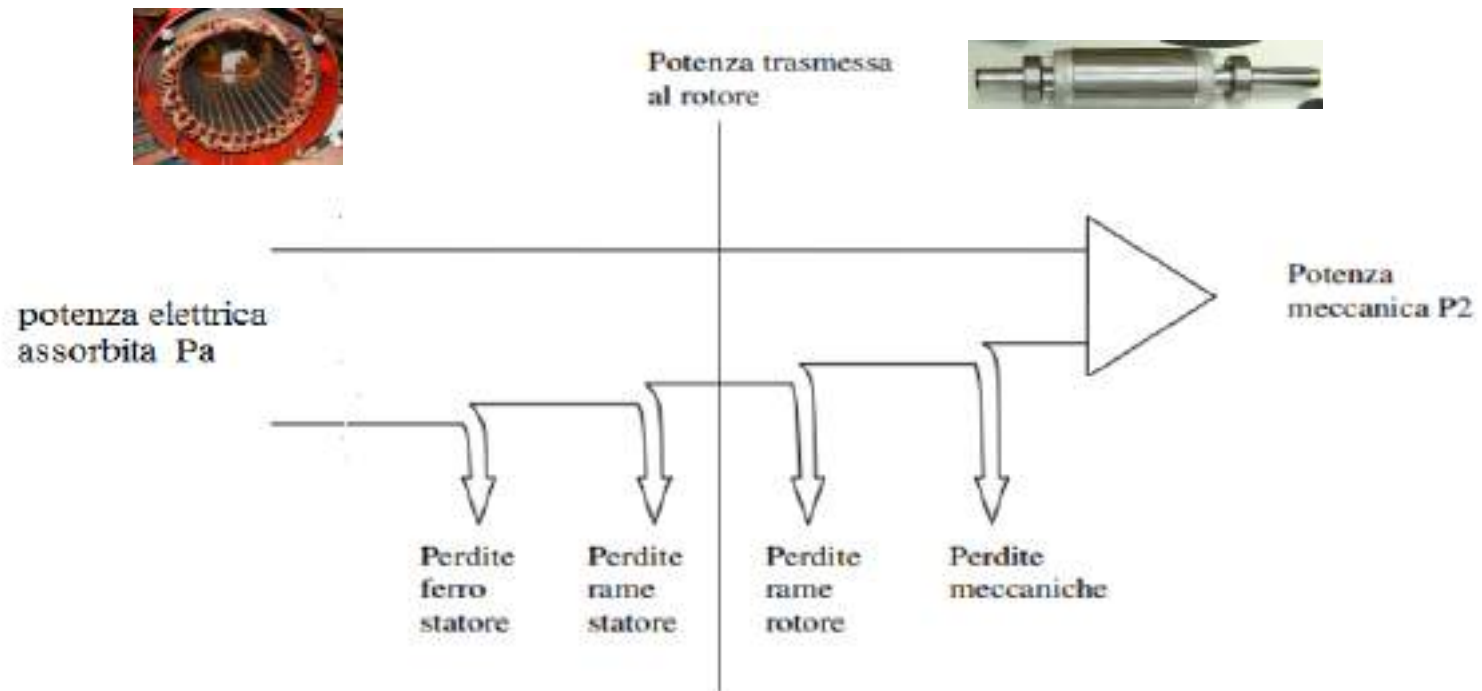


GESTIONE DEI MOTORI ELETTRICI

I motori elettrici sono macchine che convertono:
potenza elettrica (kVA)
in
potenza meccanica (kW)

Il 70% dei motori elettrici attualmente in esercizio è di tipo
asincrono trifase (o a induzione)

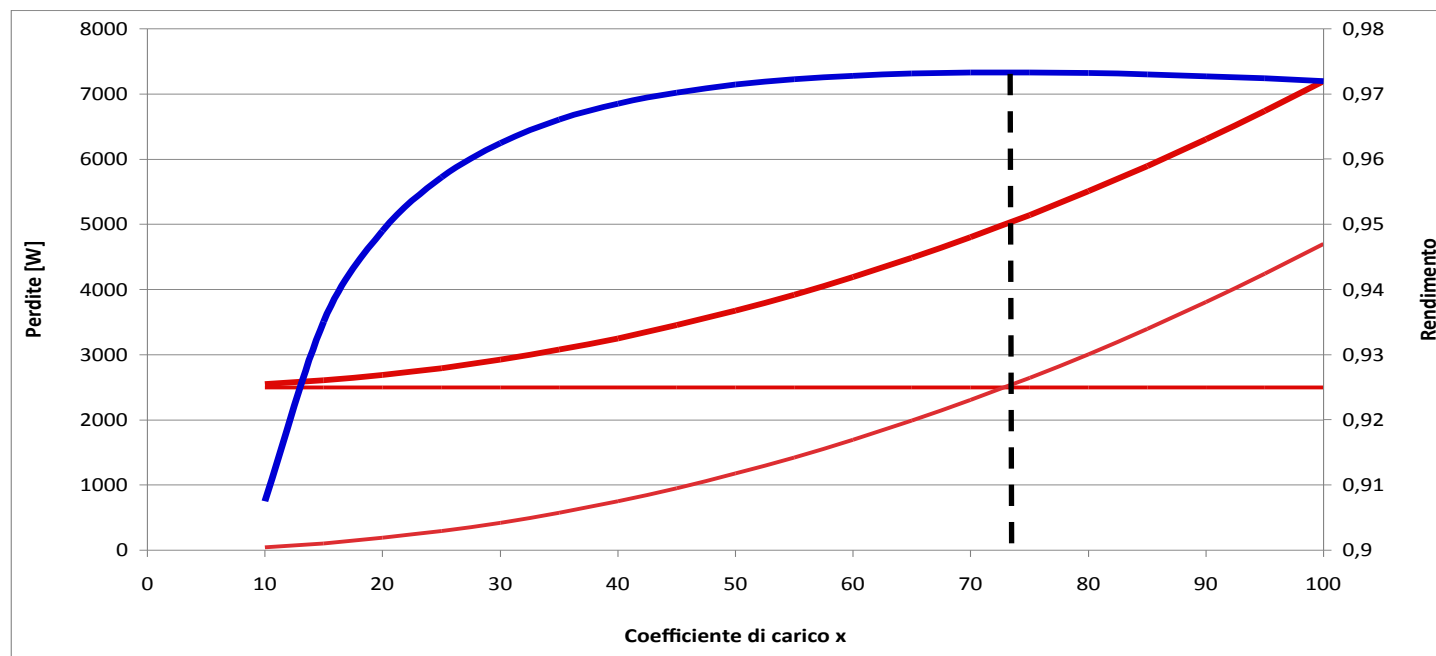
Distribuzione delle perdite nel motore asincrono



Ripartizione delle perdite in un motore asincrono

Tipo di perdita	Peso %	Fattori di dipendenza
Perdite Joule statore	30÷50	Materiali e dimensioni avvolgimenti
Perdite nel ferro	20÷25	Tipo e qualità lamierini
Perdite Joule rotore	20÷25	Materiali e dimensioni avvolgimenti
Perdite meccaniche	5÷10	Tipo cuscinetti e di raffreddamento

MOTORI ELETTRICI: RENDIMENTO E PERDITE



MOTORI ELETTRICI: RENDIMENTO E PERDITE



1) Ramo 1

- Conviene, in corrispondenza del fine vita, sostituire i motori con altri di potenza inferiore.
- A bassi carichi si abbassa anche il fattore di potenza.
- Se si sostituiscono motori sovradimensionati, i nuovi motori, avendo spesso ingombri diversi, comporteranno adattamenti in fase di montaggio il cui onere dovrà essere aggiunto al costo di acquisto.

MOTORI ELETTRICI: RENDIMENTO E PERDITE



2) Ramo 2

- In corrispondenza del fine vita può convenire sostituire i motori con altri di potenza superiore.
- Per effetto scala al crescere della potenza il costo non cresce proporzionalmente, ma tenderà a costi specifici sempre più bassi.

MOTORI ELETTRICI: RENDIMENTO E PERDITE



3) Motori funzionanti a carico variabile

- Può convenire la sostituzione con motori di classe di efficienza superiore (maggior rendimento per $x=100\%$), che presentano, al variare del carico, rendimenti mediamente superiori a quelli di un motore di classe inferiore.
- I motori elettrici sono caratterizzati da 5 classi di rendimento, dalla peggiore alla migliore: IE1, IE2, IE3, IE4, IE5.

MOTORI ELETTRICI AD ALTO RENDIMENTO

I motori elettrici ad alto rendimento hanno perdite minori per:

- ❖ nucleo più lungo e realizzato con lamierini a grani orientati a bassissime perdite;
- ❖ conduttori statorici e rotorici di sezione maggiorata per ridurre le perdite per effetto Joule;
- ❖ impiego di Cu (invece di Al) per le barre rotoriche pressofuse;
- ❖ cave ottimizzate in numero e geometria.



- Minor produzione di calore → ventole di raffreddamento più piccole con minori perdite meccaniche.
- Curva rendimento/carico più piatta.

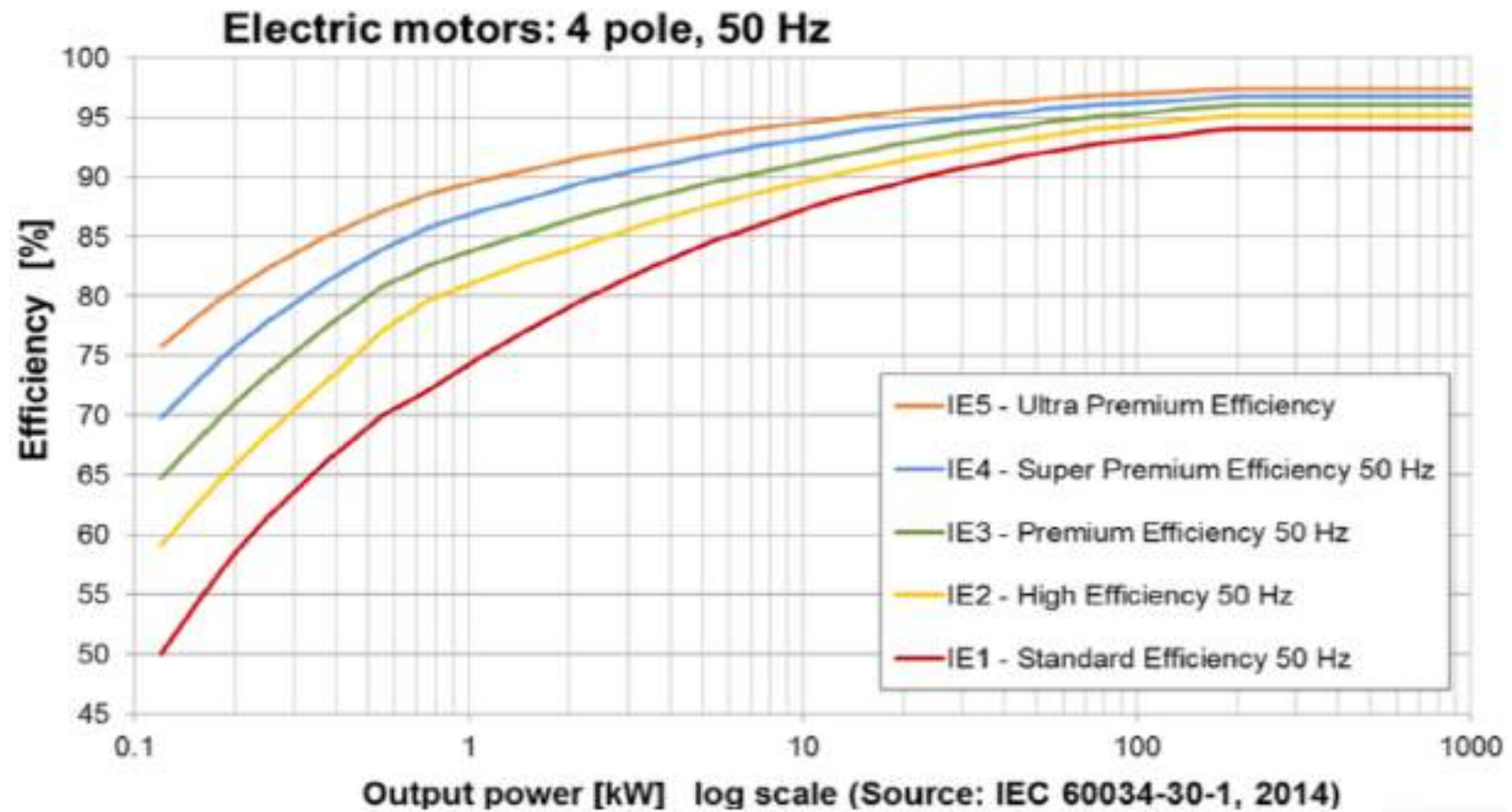
MOTORI ELETTRICI AD ALTO RENDIMENTO

Standard IEC/TS 60034-30-1 (2015)

<i>IE1</i>	<i>Standard efficiency</i>
<i>IE2</i>	<i>High efficiency</i>
<i>IE3</i>	<i>Premium efficiency</i>
<i>IE4</i>	<i>Super-Premium efficiency</i>

Standard IEC/TS 60034-30-2 (2016)

<i>IE5</i>	<i>Ultra Premium Efficiency</i>
-------------------	--

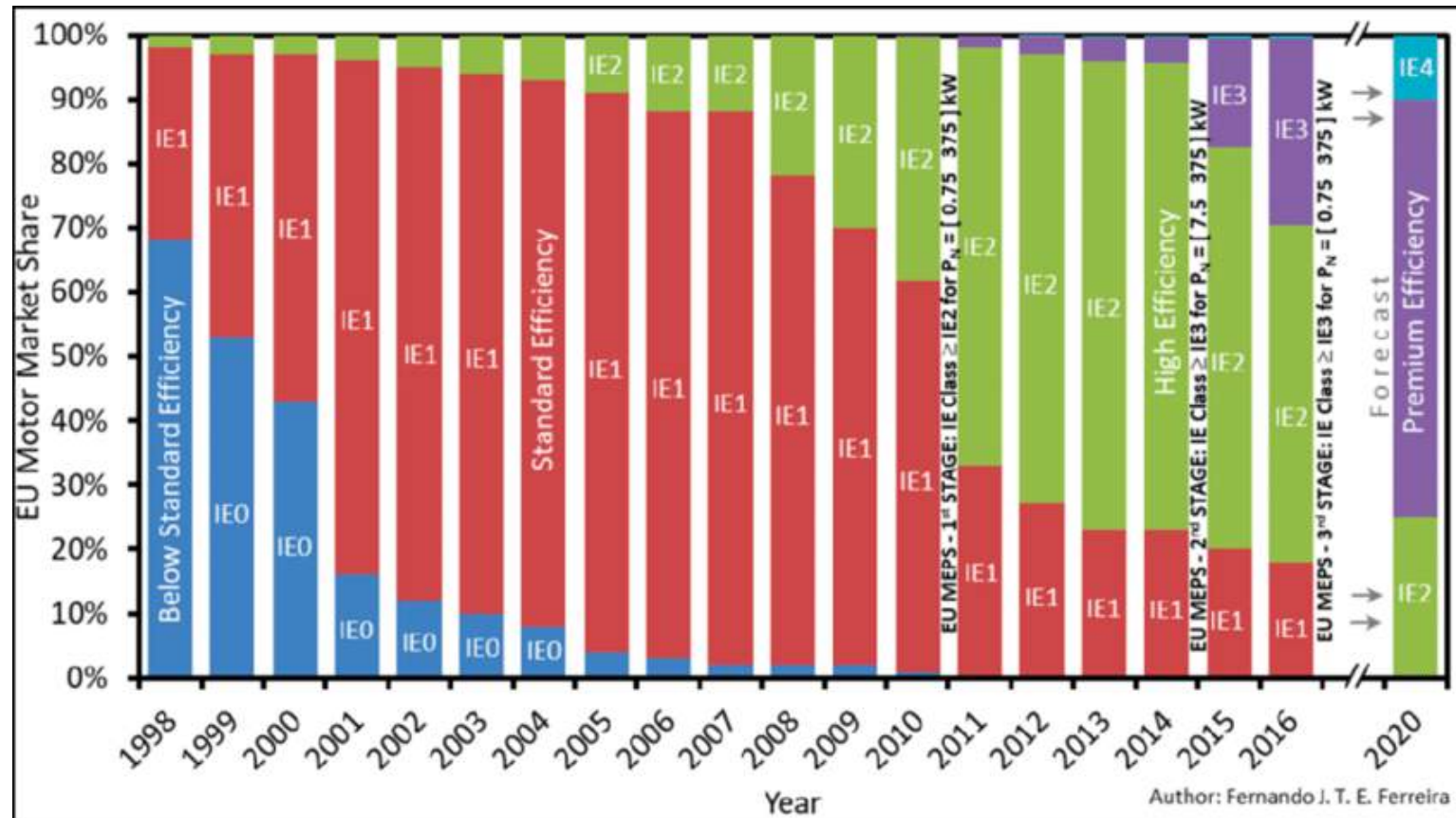


Valori minimi di efficienza a 50 Hz definiti nello standard IEC/EN 60034-30-1:2014 (sulla base dei metodi di prova specificati nello standard IEC 60034-2-1:2014)

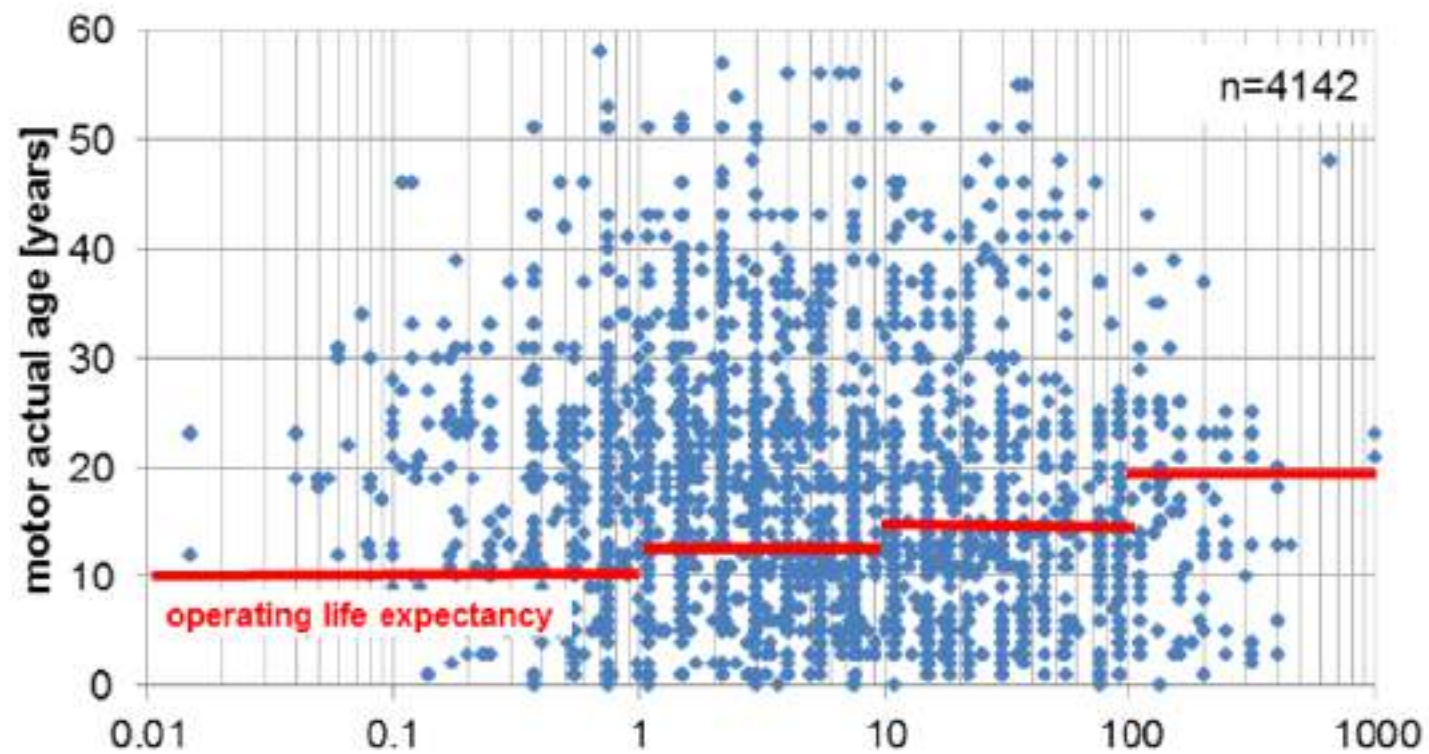
Potenza	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2 poli	4 poli	6 poli	8 poli	2 poli	4 poli	6 poli	8 poli	2 poli	4 poli	6 poli	8 poli	2 poli	4 poli	6 poli	8 poli
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	60.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	62.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	65.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	67.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	69.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	73.8	77.3	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	66.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	74.6	78.0	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	77.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	95.2	95.4	95.1	93.7	96.0	96.3	95.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	95.4	95.6	95.4	94.0	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.8	93.8	93.8	91.9	94.8	94.9	94.8	93.0	95.6	95.8	95.6	94.3	96.3	96.6	96.2	95.1
200	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
250	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.5	95.4
315	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
355	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
400	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
450	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
500-1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4

Regolamenti CE n. 640/2009 (Direttiva Ecodesign 2009/125/CE) e (UE) 2019/1781 della Commissione dell'1-10-2019

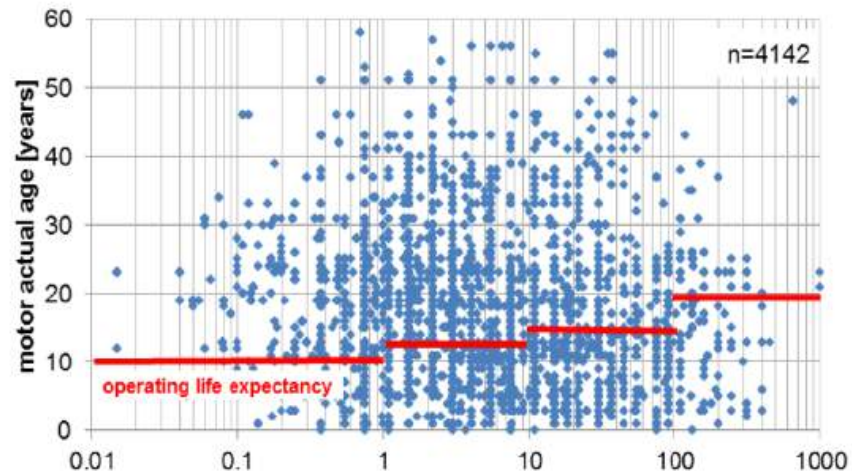
A partire da	Requisiti richiesti
16/6/2011	Tutti i motori, come sopra definiti, dovranno avere una efficienza minima pari a quella del livello IE2
1/01/2015	Tutti i motori, come sopra definiti, con potenza compresa tra 7,5 e 375 kW dovranno avere una efficienza minima pari a quella del livello IE3
1/01/2017	Tutti i motori, come sopra definiti, con potenza compresa tra 0,75 e 5,5 kW dovranno avere una efficienza minima pari a quella del livello IE3
1/07/2021	1) L'efficienza energetica dei motori trifase con una potenza nominale pari o superiore a 0,75 kW e pari o inferiore a 1 000 kW, con 2, 4, 6 o 8 poli [...], corrisponde almeno al livello di efficienza IE3 2) l'efficienza energetica dei motori trifase con una potenza nominale pari o superiore a 0,12 kW e inferiore a 0,75 kW, con 2, 4, 6 o 8 poli [...] corrisponde almeno al livello di efficienza IE2
1/07/2023	L'efficienza energetica dei motori trifase che non sono motori autofrenanti, motori a sicurezza aumentata Ex eb o altri motori protetti dalle esplosioni, con una potenza nominale pari o superiore a 75 kW e pari o inferiore a 200 kW, con 2, 4 o 6 poli, corrisponde almeno al livello di efficienza IE4



Analisi dell'età dei motori elettrici installati in Europa (Studio CH)

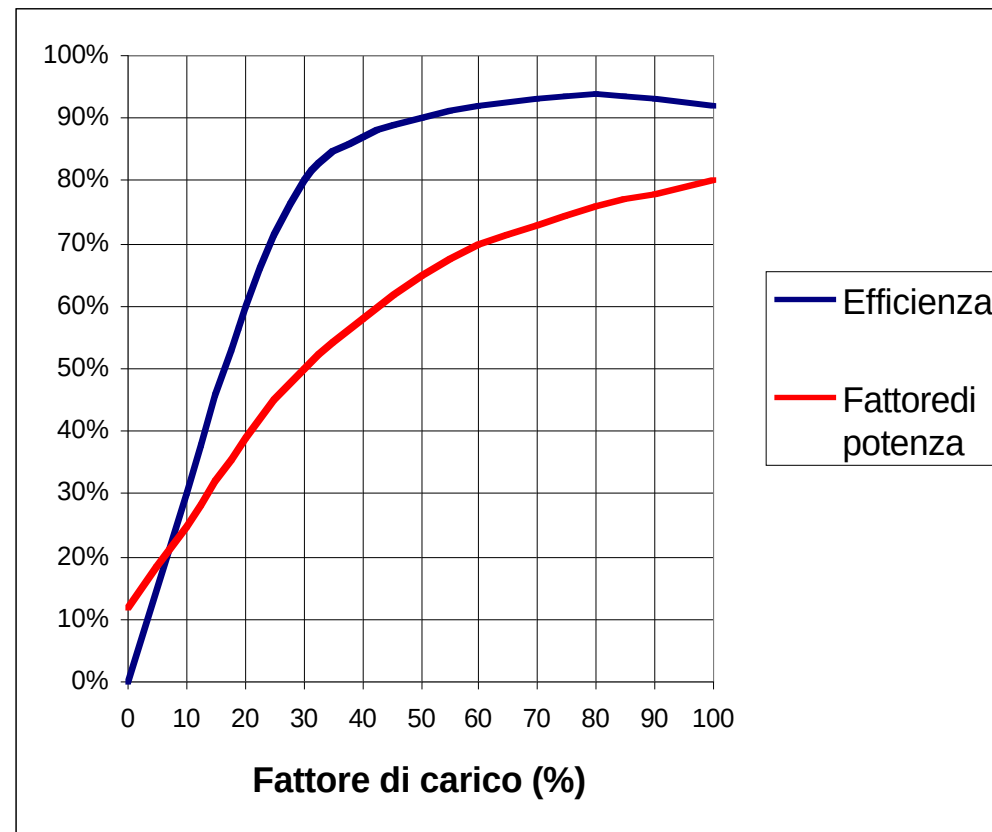


Motor output power [kW] logarithmic scale



- Il 56 % dei motori installati ha un'età superiore alla vita utile
- I 2/3 hanno un impiego con un fattore di carico inferiore al 60%
- Solo il 20% hanno un regolatore di velocità (VSD)

RELAZIONE TRA FATTORE DI CARICO, FATTORE DI POTENZA, EFFICIENZA



VARIATORI DI VELOCITÀ



VARIATORI DI VELOCITÀ

In un motore asincrono la velocità di rotazione è fissa:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

n_0 : numero di giri del motore (giri/min);

f : frequenza di alimentazione del motore (Hz);

p : numero di coppie polari.

Velocità di rotazione di motori elettrici

<i>Coppie polari p</i>	<i>numero di giri n_0 [giri/min]</i>
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600

VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

I variatori di velocità, o *inverter*, realizzano la regolazione variando la frequenza di alimentazione del motore f in maniera continua, agendo così sul numero di giri del motore.

La potenza utile che un motore elettrico deve erogare è:

$$P = M \omega \text{ [W]}$$

M : coppia resistente (Nm)

ω : velocità angolare (rad/s)

Se...

$\omega\omega\omega\omega\omega$

VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

La diminuzione di potenza dipende anche dalla **variazione di coppia applicata al motore**.

Quando **$M=cost$** al variare di n (nastri trasportatori, compressori a vite e alternativi, agitatori, argani, gru, montacarichi, ecc.):

$$P = cost \cdot \omega$$

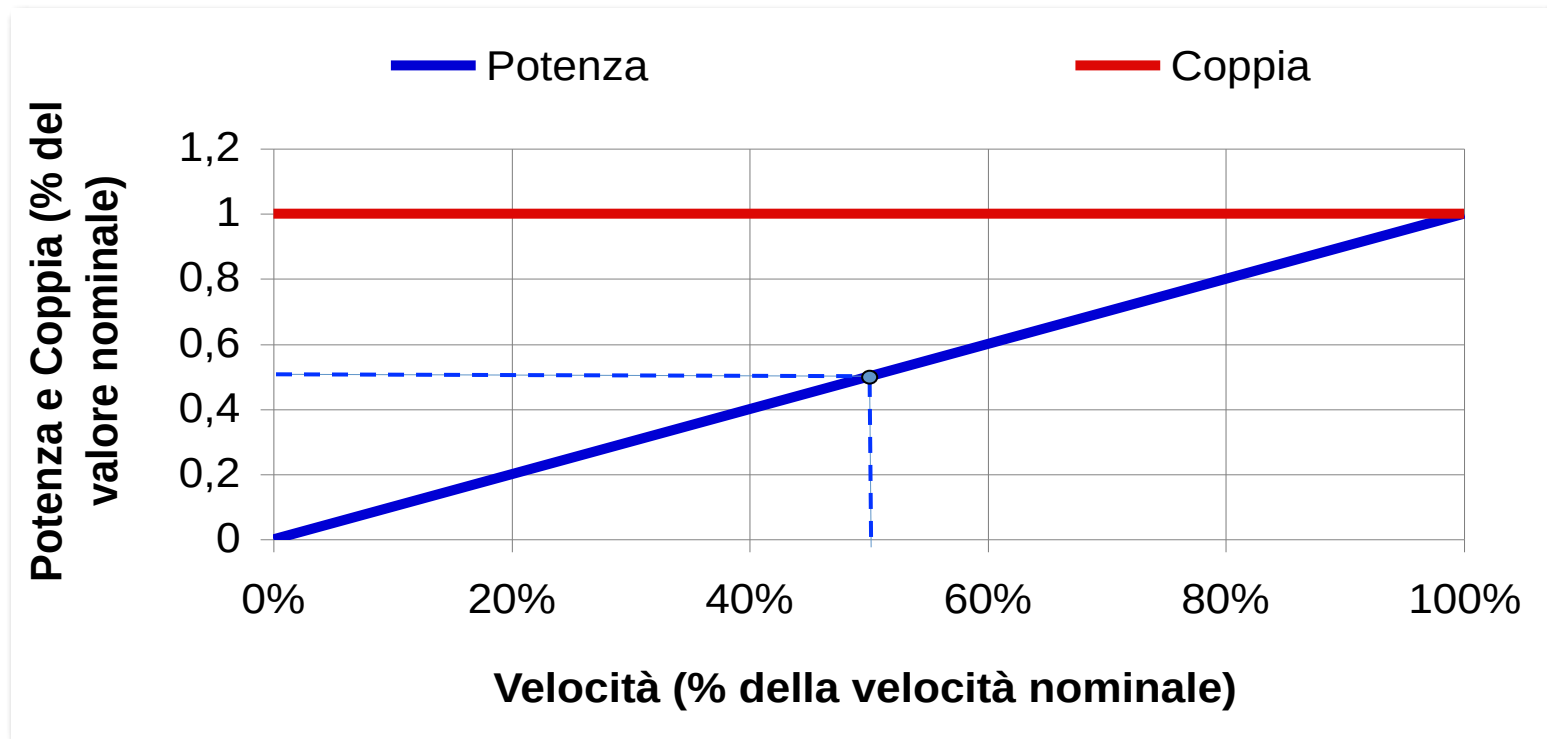


P varia **linearmente** con n del motore

$$\text{Se: } n \rightarrow 50\% n_n \quad P \rightarrow 0,5 P_n \quad E \rightarrow 0,5 E_n$$

VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$



VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Quando M varia quadraticamente al variare di n (pompe, ventilatori)

$$P = (M)\omega = (cost \cdot \omega^2) \cdot \omega$$



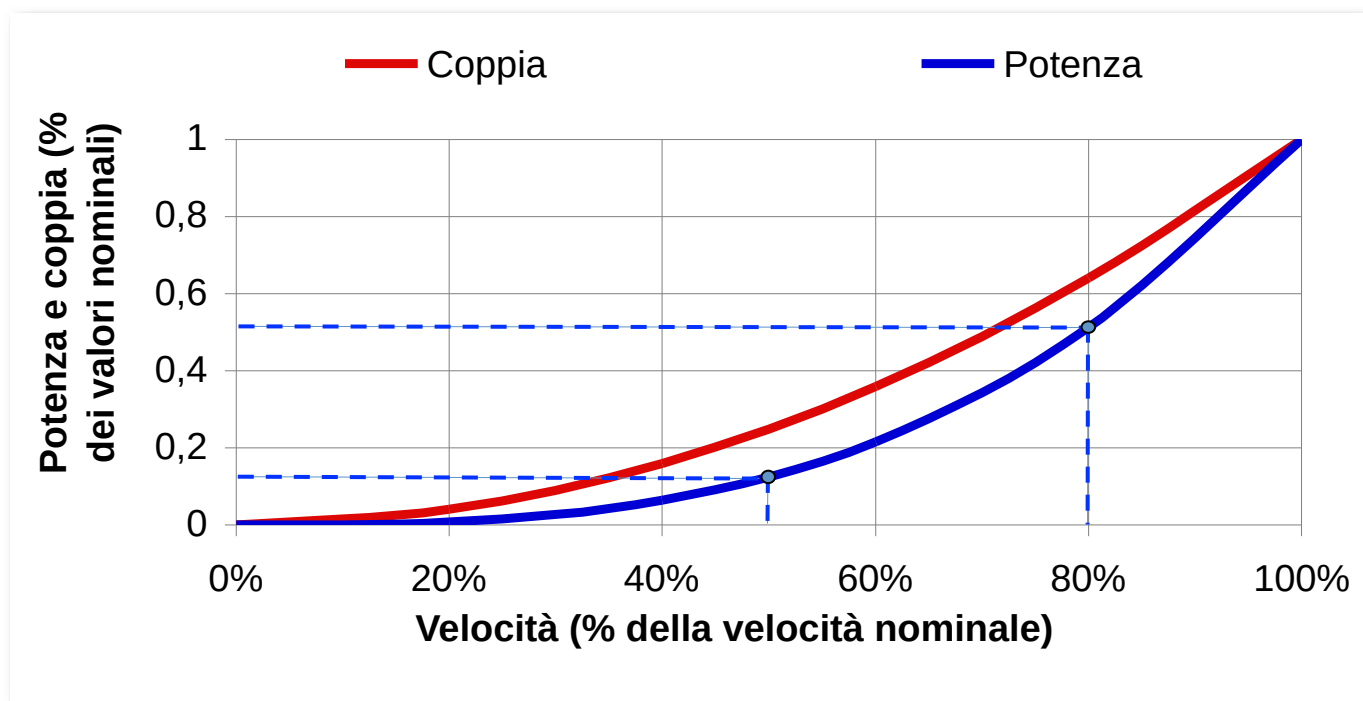
P varia con n^3

$$\text{Se } n \rightarrow 80\% n_n \quad P \rightarrow 0,5 P_n \quad (0,8^3 \approx 0,5) \quad E \rightarrow 0,5 E_n$$

$$\text{Se } n \rightarrow 50\% n_n \quad P \rightarrow 0,125 P_n \quad (0,5^3 = 0,125) \quad E \rightarrow 0,125 E_n$$

VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$



VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

EFFETTI CROSS MEDIA: rendimento degli inverter

Rapporto di riduzione della frequenza		25%	50%	75%	100%
		Rendimento inverter [%]			
<i>Taglia inverter [kW]</i>	<i>0,1÷1</i>	74,0	80,0	85,0	88,0
	<i>1÷10</i>	83,0	87,0	90,5	92,5
	<i>10÷100</i>	92,0	94,0	96,0	97,0
	<i>100÷1000</i>	95,0	96,0	97,0	98,0
	<i>>1000</i>	96,0	96,5	97,0	98,0

VARIATORI DI VELOCITÀ

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

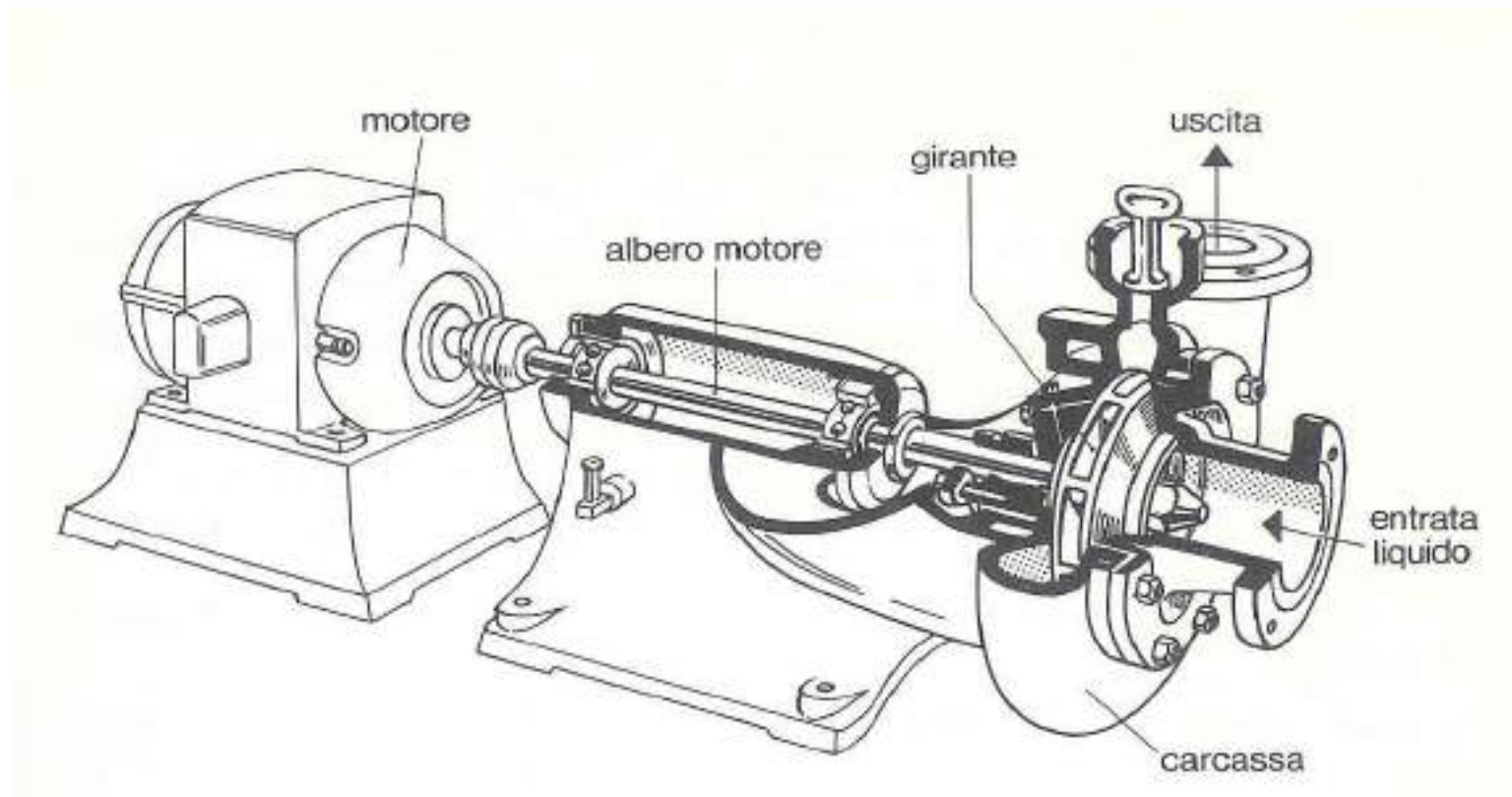
Controindicazioni per gli inverter:

- ✓ produzione di armoniche
- ✓ diminuzione del rendimento del motore elettrico
- ✓ costo

Regola aurea:

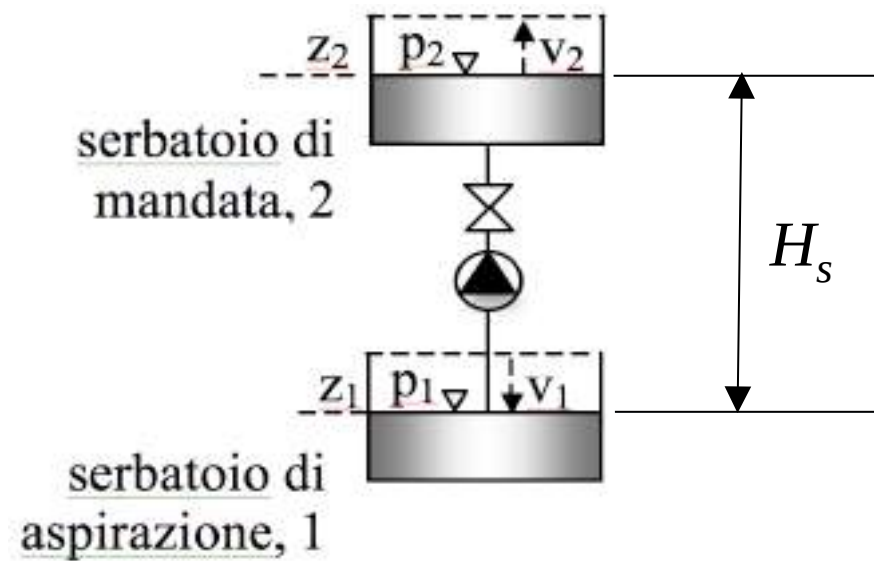
- ✓ installare inverter per carichi variabili
- ✓ non installare inverter per carichi costanti

POMPAGGI



POMPAGGI

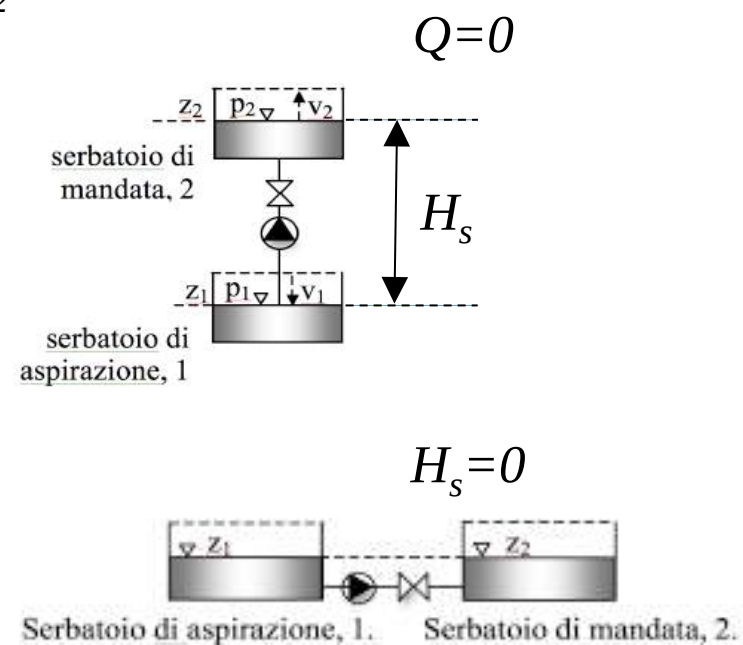
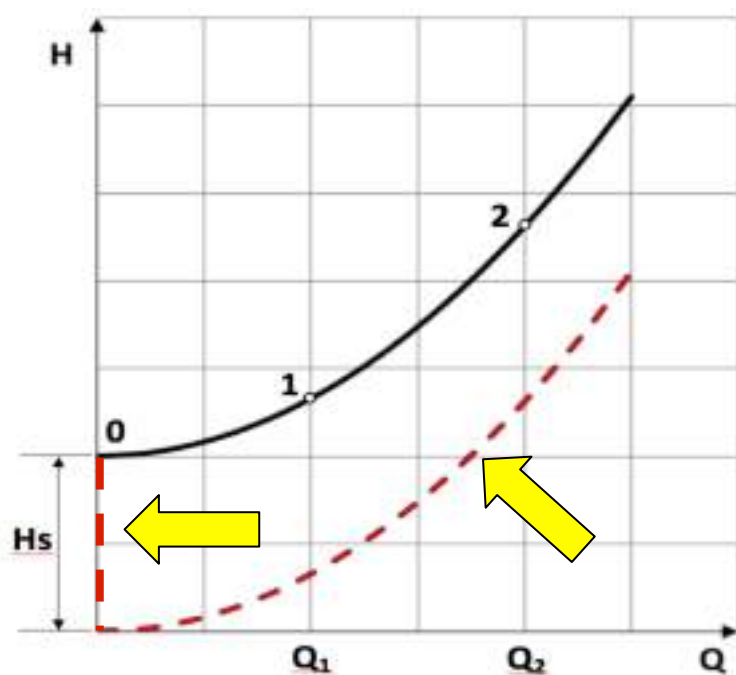
PREVALENZA DI POMPAGGIO



POMPAGGI

CARATTERISTICA DELLA TUBAZIONE (ESTERNA) $H=f(Q)$

$$H = H_s + kQ^2$$

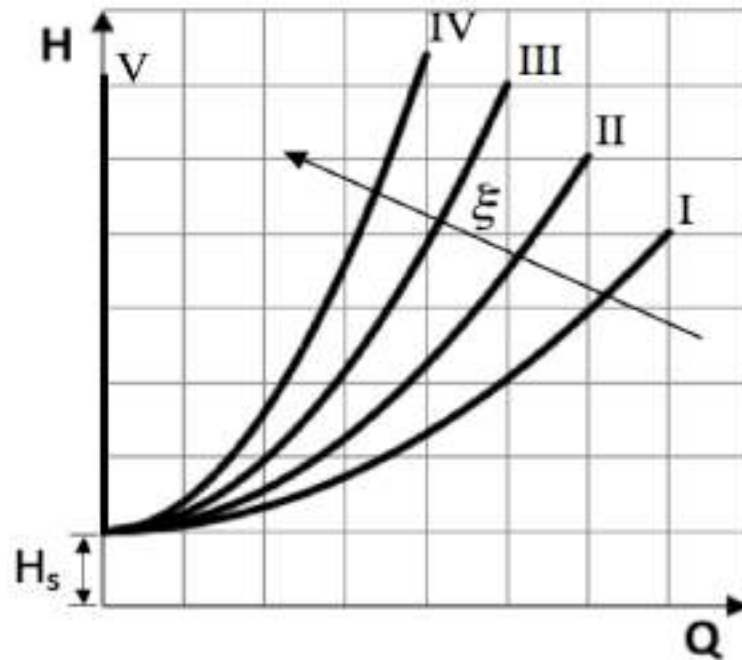


POMPAGGI

CARATTERISTICA DELLA TUBAZIONE (ESTERNA) $H=f(Q)$

$$H = H_s + kQ^2$$

Il coefficiente k dipende dal coefficiente di resistenza concentrata ξ



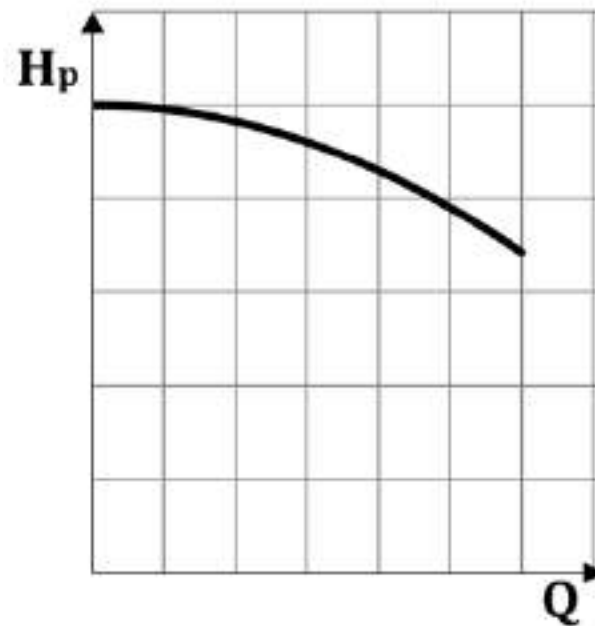
POMPAGGI

CARATTERISTICA DELLA POMPA (INTERNA) $H=f(Q)$

Prevalenza teorica (lavoro per sollevare la portata Q all'altezza H) =
= prevalenza della pompa + perdite interne alla pompa

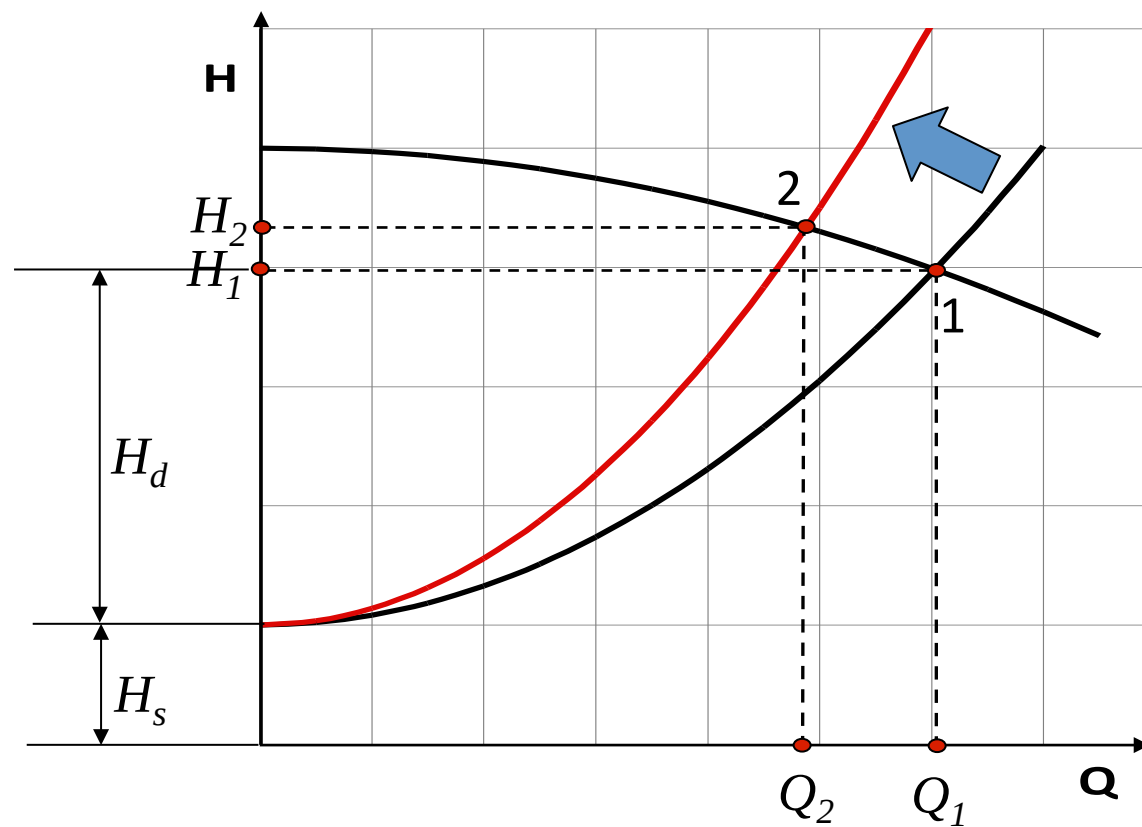
$$H_t = H_p + h_i$$

$$H_p = H_t - h_i = H_t(Q) - h_i(Q^2)$$



POMPAGGI

CARATTERISTICA CIRCUITO-POMPA



POMPAGGI

Spesso la potenza installata di pompaggio è esuberante rispetto a quella strettamente necessaria, data da:

$$P = \rho g H Q$$

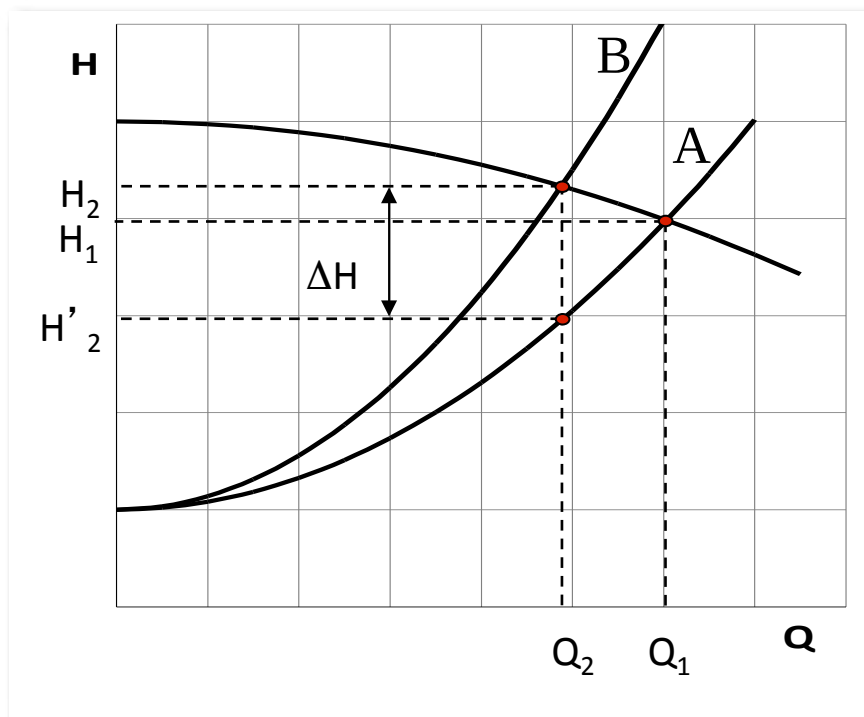
L'energia non necessaria ai fini del pompaggio viene **dissipata** in valvole, ricircoli e/o nell'alta velocità di efflusso

POSSIBILI INTERVENTI:

1. Verificare, per le pompe più grandi e funzionanti più a lungo, le **effettive necessità di pompaggio**
2. Evitare di controllare la portata tramite metodi **dissipativi**

POMPAGGI

2. Evitare di controllare la portata tramite metodi **dissipativi**



h = ore annue di funzionamento
 Q [l/s]

$$E_{reale} = \frac{Q_2 H_2 \cdot h}{102 \eta_2} \quad [kWh]$$

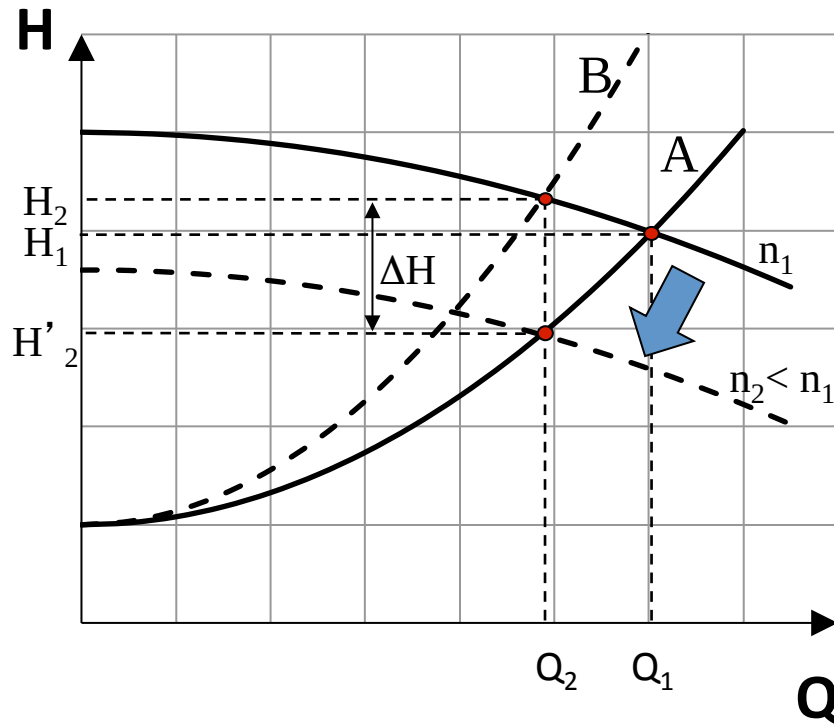
$$E_{teorico} = \frac{Q_2 H'_2 \cdot h}{102 \eta'_2} \quad [kWh]$$

Sovraconsumo energetico:

$$\Delta E = \frac{h Q_2}{102} \left(\frac{H_2}{\eta_2} - \frac{H'_2}{\eta'_2} \right) \quad [kWh]$$

POMPAGGI

2. Evitare di controllare la portata tramite metodi **dissipativi: inverter**

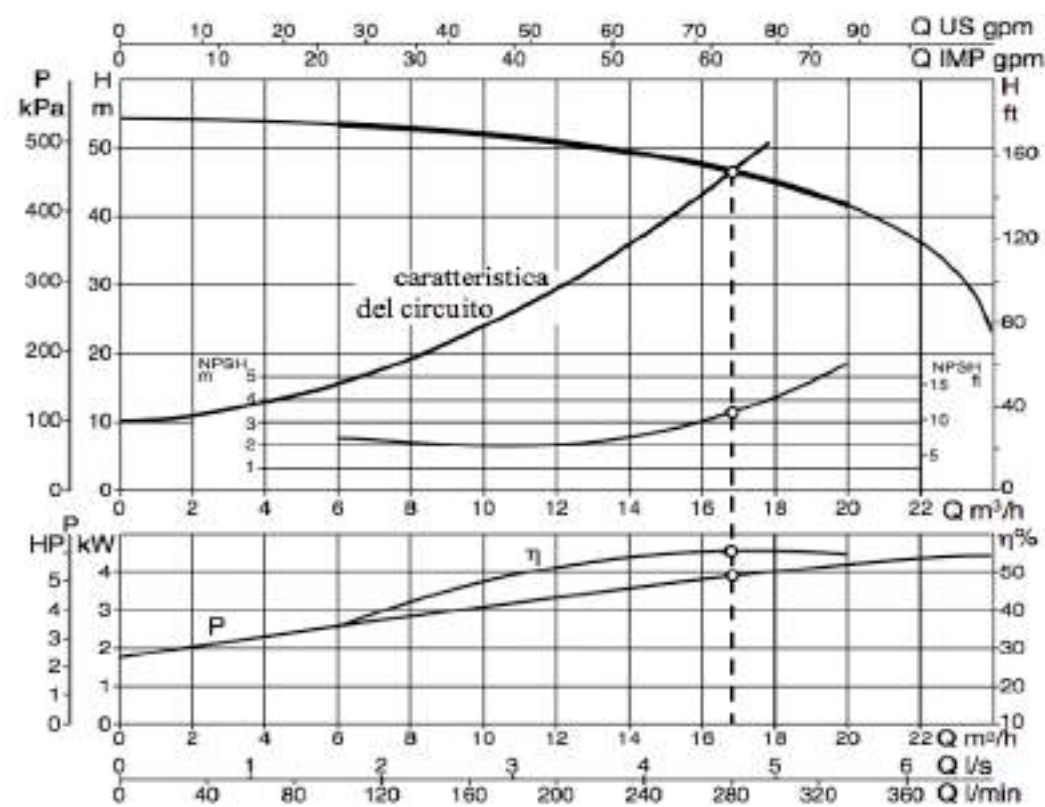


Sovraconsumo energetico risparmiato

$$\Delta E = \frac{h Q_2}{102} \left(\frac{H_2}{\eta_2} - \frac{H'_2}{\eta'_2} \right) \quad [kWh]$$

POMPAGGI

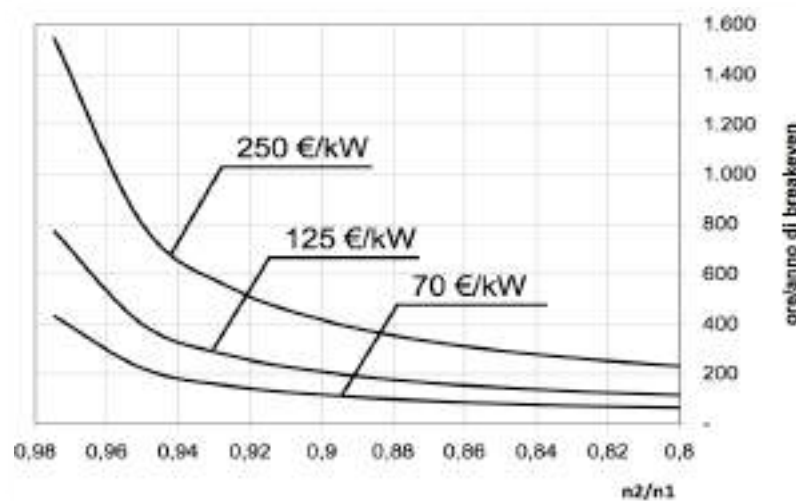
CARATTERISTICA CIRCUITO-POMPA



POMPAGGI

Convenienza economica dell'inverter

c_{kWh}	costo energia elettrica	0,2	€/kWh
c_{inv}	costo dell'inverter da 1,0 a 1,5 kW	250	€/kW
c_{inv}	costo dell'inverter da 1,5 a 5,5 kW	125	€/kW
c_{inv}	costo dell'inverter da oltre 5,5 kW	70	€/kW
FA	fattore di annualità	7,72	anni
η	rendimento motore-pompa	70	%



VENTILAZIONE

CLASSIFICAZIONE IN BASE ALLA PRESSIONE FORNITA:

classe I	bassa pressione	$< 900 \text{ Pa}$
classe II	media pressione	$900 \div 1700 \text{ Pa}$
classe III	alta pressione	$1700 \div 3000 \text{ Pa}$

Le canalizzazioni dell'aria sono dimensionate:

- **nel settore terziario e residenziale**, per velocità dell'aria in mandata basse ($6 \div 11 \text{ m/s}$) o alte ($> 13 \text{ m/s}$), e in ripresa per velocità di $7,5 \div 9 \text{ m/s}$
- **in industria** per velocità in mandata di $13 \div 25 \text{ m/s}$, ed in ripresa di $9 \div 11 \text{ m/s}$.

VENTILAZIONE

- le pressioni sono misurate in millimetri di colonna d'acqua o in pascal:

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9,806 \text{ Pa}$$

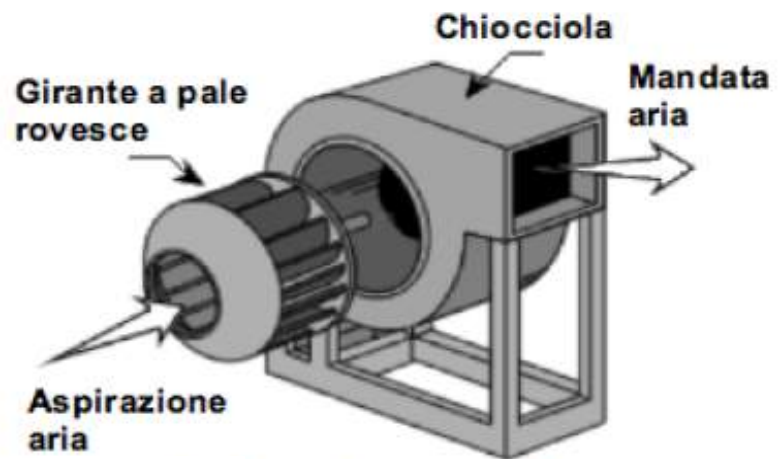
- le portate sono misurate in m^3/s , m^3/min , m^3/h
- le portate dei ventilatori sono riferite ad aria in condizioni standard (15°C e $760 \text{ mm Hg} = 101.325 \text{ Pa}$)
- per circuiti aeraulici eserciti in media pressione si può ritenere che l'aria si comporti come un fluido **incomprimibile**: restano valide le equazioni di stato dei gas e le equazioni di continuità.

VENTILAZIONE

In funzione dell'unità di misura con cui sono espresse portata Q_v e prevalenza H_v , la potenza assorbita assume le seguenti connotazioni:

		Q_v in:		
		m^3/s	m^3/min	m^3/h
H_v in:	Pa	$P = \frac{Q_v H_v}{1000 \eta} [kW]$	$P = \frac{Q_v H_v}{60.000 \eta} [kW]$	$P = \frac{Q_v H_v}{3.600.000 \eta} [kW]$
	mm H ₂ O	$P = \frac{Q_v H_v}{102,0 \eta} [kW]$	$P = \frac{Q_v H_v}{6118,7 \eta} [kW]$	$P = \frac{Q_v H_v}{367.122,2 \eta} [kW]$

VENTILAZIONE



Ventilatore centrifugo.

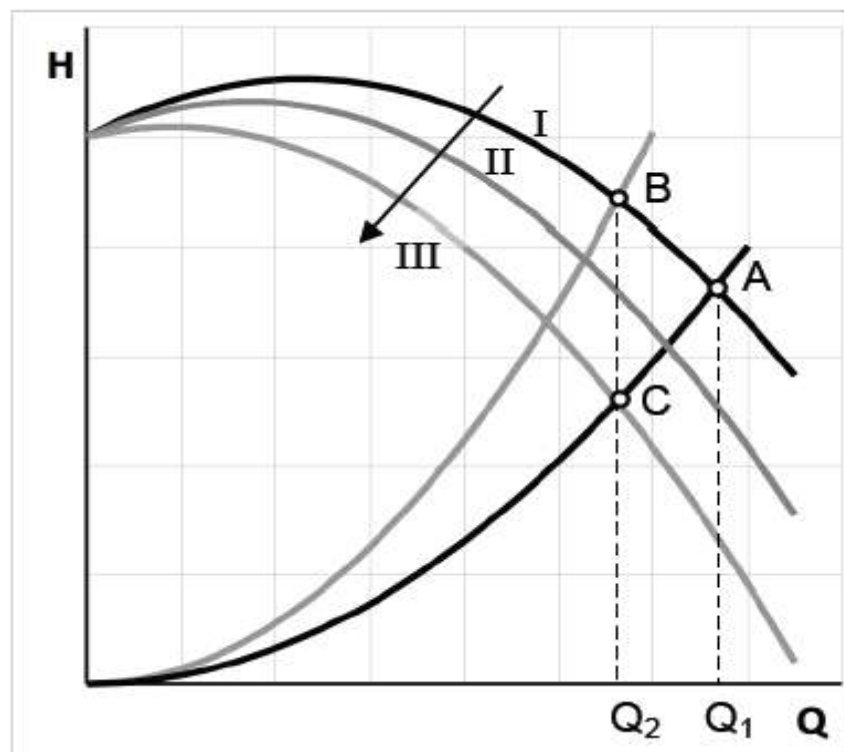


Ventilatore assiale.

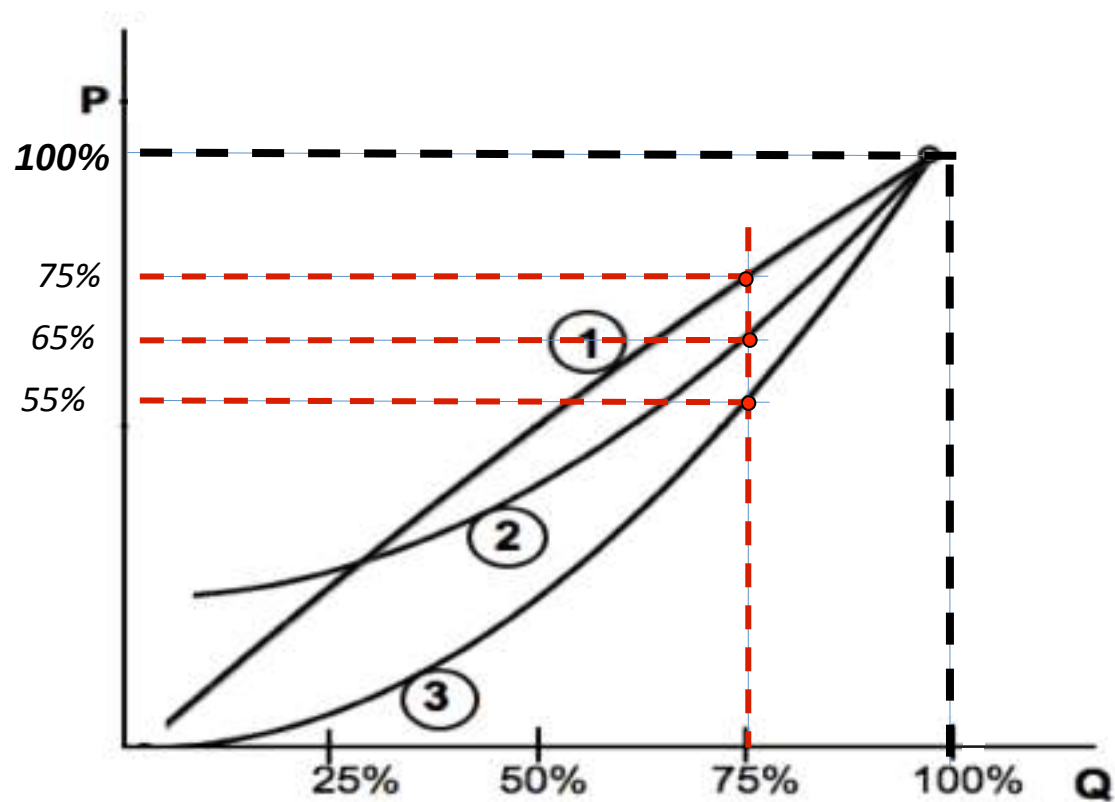
VENTILAZIONE



Serranda con alette di pre-rotazione

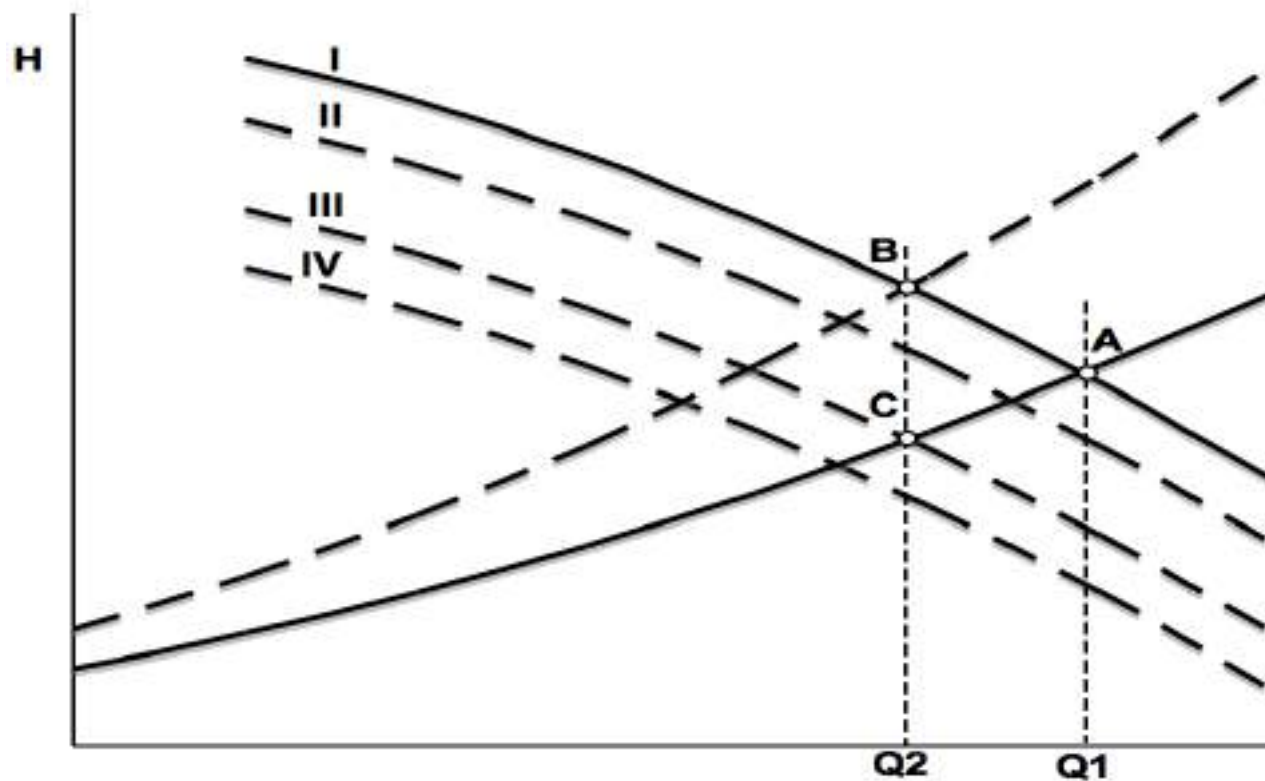


VENTILAZIONE



① strozzamento ② alette prerotazione ③ inverter

VENTILAZIONE



Ventilatori assiali: modulazione della portata
con regolazione del passo tra le pale

IMPIANTO ARIA COMPRESSA



ARIA COMPRESSA - DISPOSITIVI



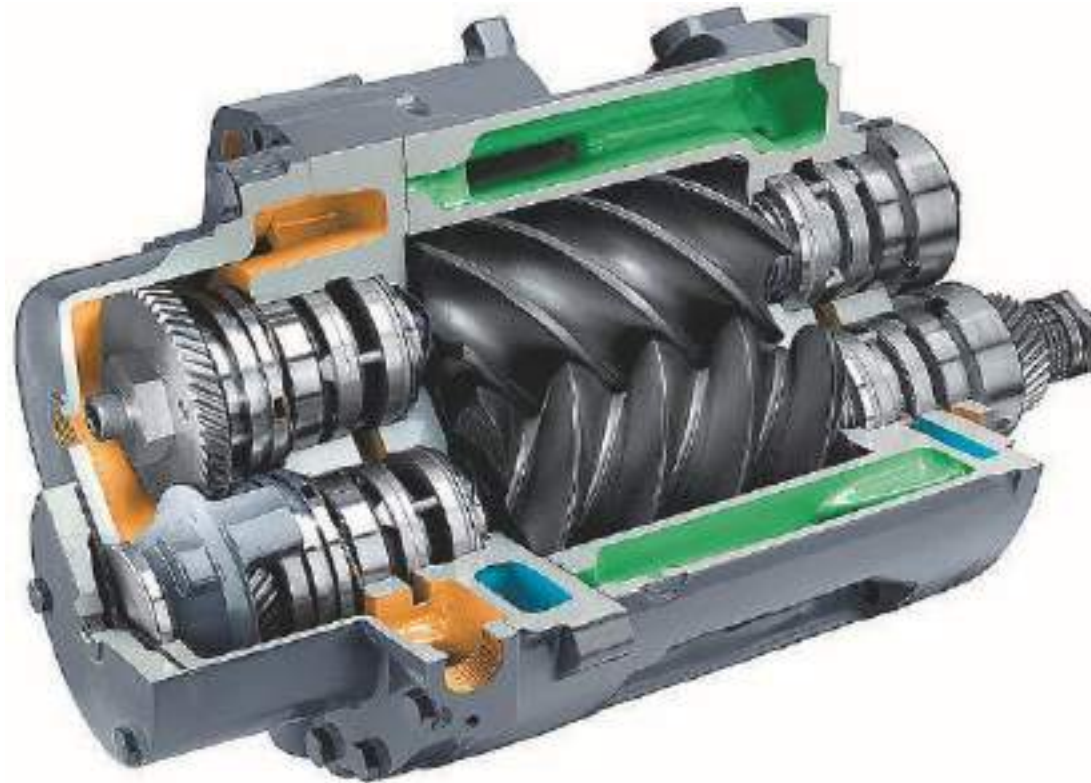
ARIA COMPRESSA - DISPOSITIVI



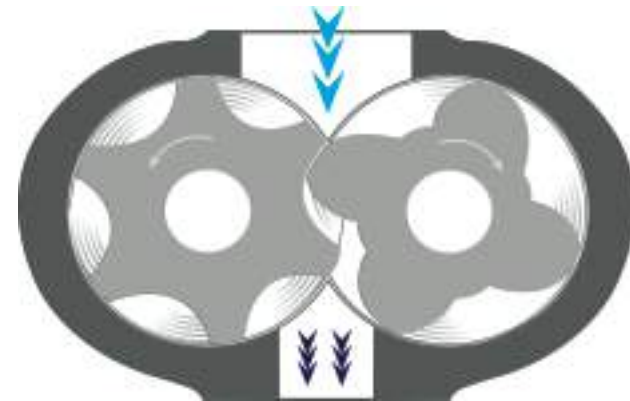
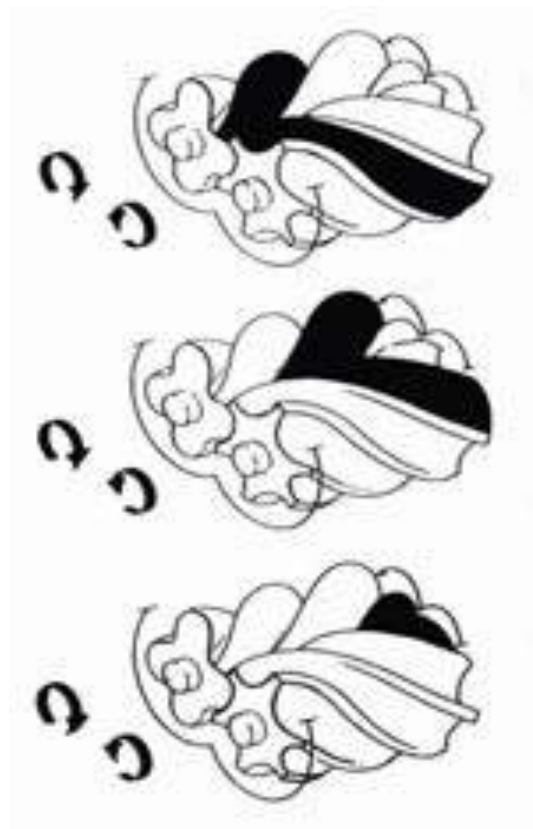
ARIA COMPRESSA - DISPOSITIVI



ARIA COMPRESSA – COMPRESSORE A VITE



ARIA COMPRESSA – COMPRESSORE A VITE



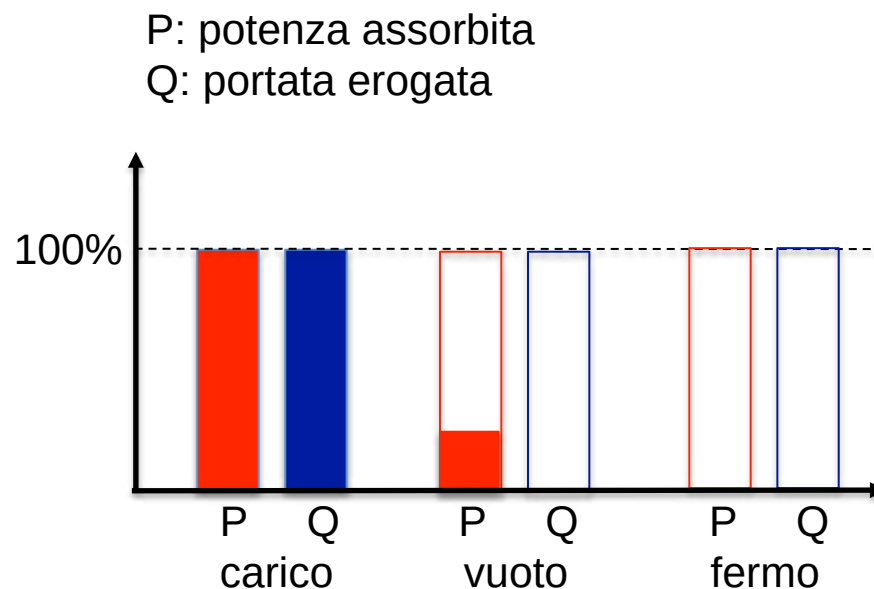
ARIA COMPRESSA - CONTROLLO

Un compressore lavora secondo tre modalità:

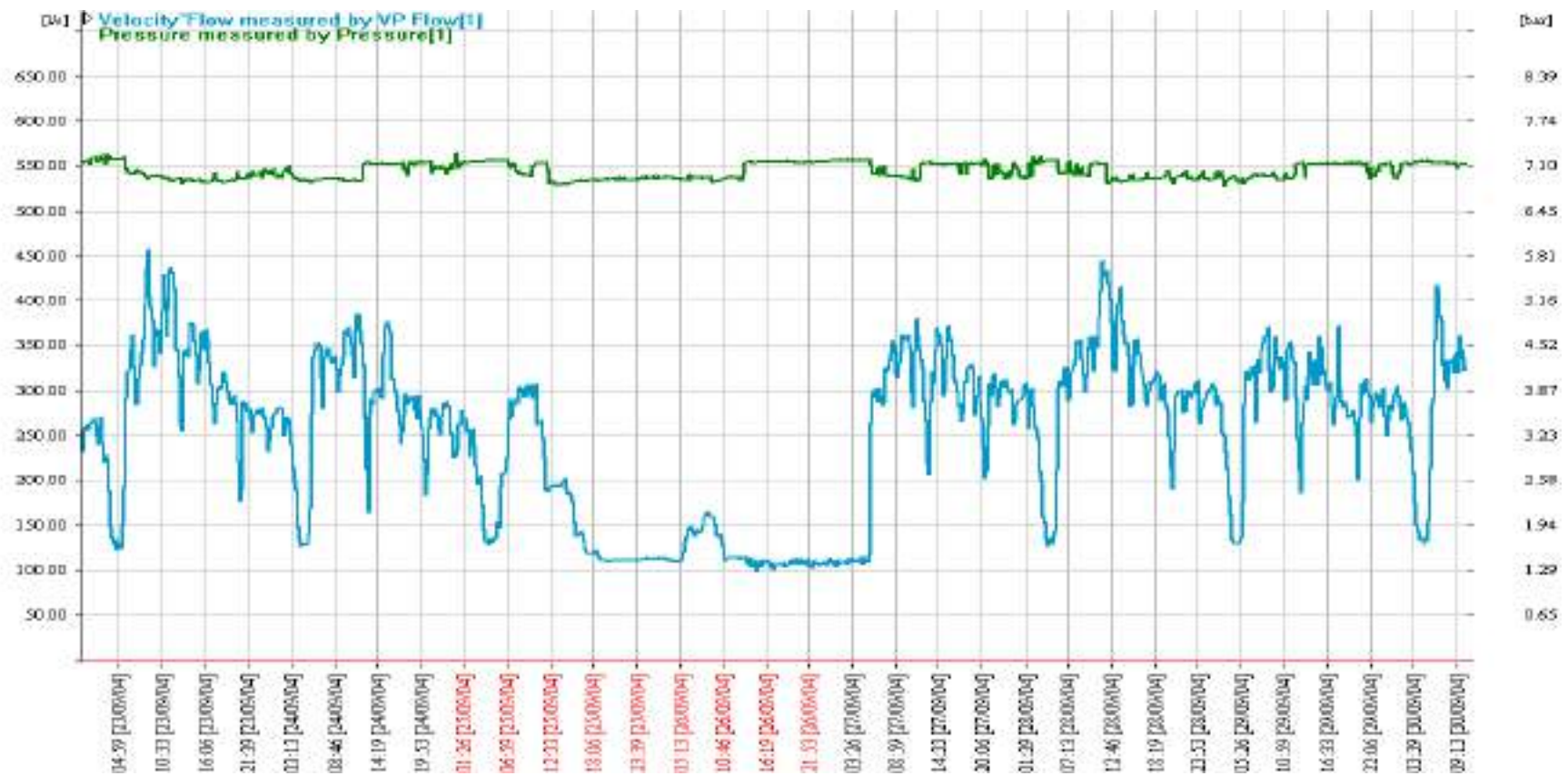
- **pieno carico** (la potenza assorbita dal motore corrisponde alle condizioni di progetto)
- **vuoto** (la potenza assorbita dal motore corrisponde ad un coefficiente di carico variabile tra il 15 ed il 35%. A vuoto, il $\cos\varphi$ si abbassa)
- **fermo** (nessun assorbimento)

Per evitare eccessive variazioni di carico sul compressore:

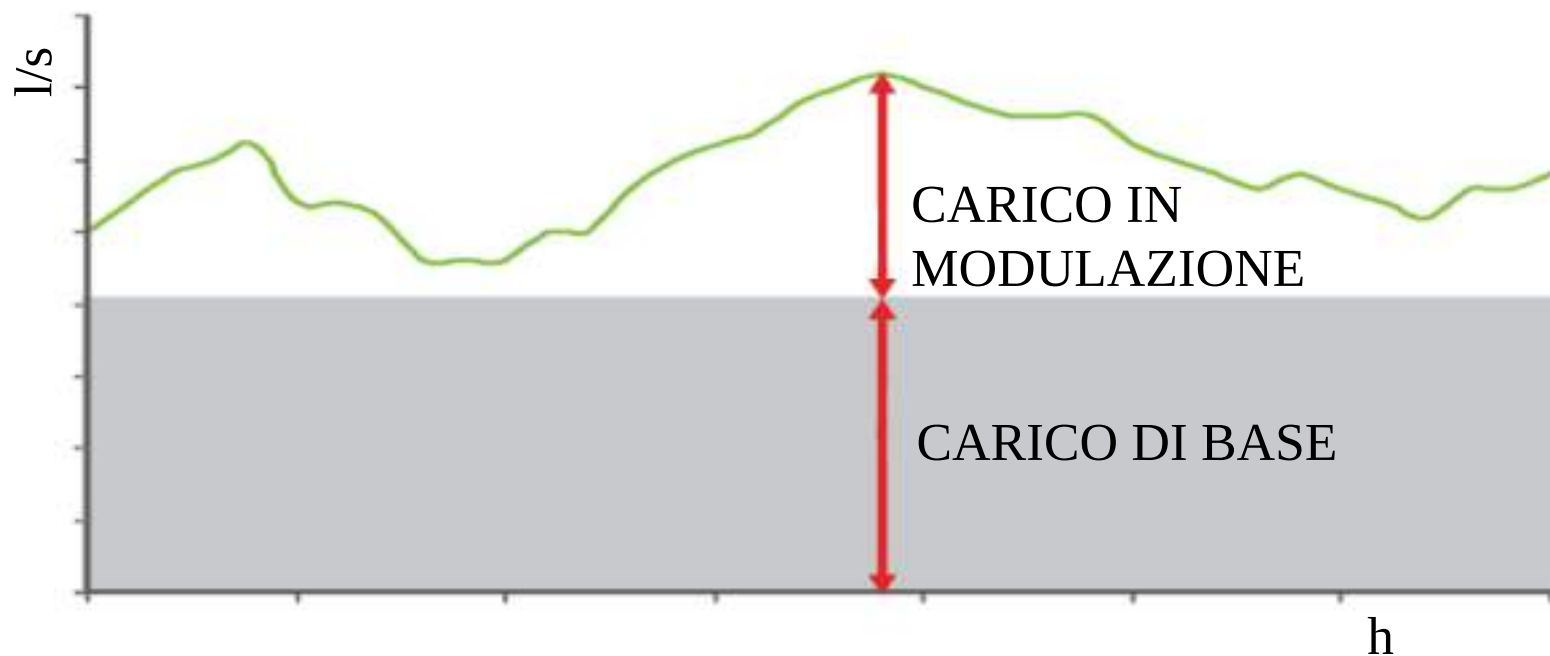
- Interposizione di serbatoi-polmone
- Uso di inverter



ARIA COMPRESSA - CONTROLLO



ARIA COMPRESSA - CONTROLLO



L'approccio è analogo anche in altri contesti: pompaggi acqua, centrali termiche, ventilazione, ecc.

ARIA COMPRESSA - GESTIONE DELL' IMPIANTO

L' impianto di aria compressa è considerato poco 'critico' perché tratta aria liberamente disponibile in natura.

INVECE è uno degli impianti più trascurati e con minore efficienza all' interno di un' azienda industriale, e quindi in grado di liberare grandi potenziali di risparmio.

Costi per produzione di aria compressa (Costo elettricità: 0,2 €/kWh. Tempo carico: 0,6 - Tempo vuoto: 0,4)								
P [kW]	Q [l/s]	H [h/a]	Q_A [m ³ /a]	E [kWh/a]	η [m ³ /kWh]	$1/\eta$ [kWh/m ³]	C [€/a]	CS [c€/m ³]
11	22,4	6.000	290.304	49.967	5,8	0,17	9.993	3,4
55	137,6	6.000	1.783.296	236.010	7,6	0,13	47.202	2,7
90	233,6	6.000	3.027.456	376.463	8,0	0,12	75.293	2,5
160	404,0	6.000	5.235.840	650.891	8,0	0,12	130.178	2,5

ARIA COMPRESSA - GESTIONE DELL' IMPIANTO - PORTATA E PRESSIONE

- AC in impianti industriali e terziari: 6 ÷ 10 bar.
- In dati cicli produttivi pressioni più alte (decine di bar).
- Per pressioni e portate medio-basse (~7 bar e 65 m³/min) si usano compressori a vite o a pistoncini.
- Per portate più alte si usano compressori centrifughi.
- Condizioni di riferimento dell' aria in entrata:
 $p_1 = 1 \text{ bar (a)}$ $T_1 = 20 \text{ C}^\circ$ umidità = 0%

ARIA COMPRESSA - GESTIONE DELL' IMPIANTO - RETE DISTRIBUZIONE

Contenere le cadute di pressione, che dipendono dalla velocità dell'aria, che (a parità di portata) dipende dalla sezione delle tubazioni.

Minore è il diametro della tubazione più aumenta la velocità e più aumentano le perdite.

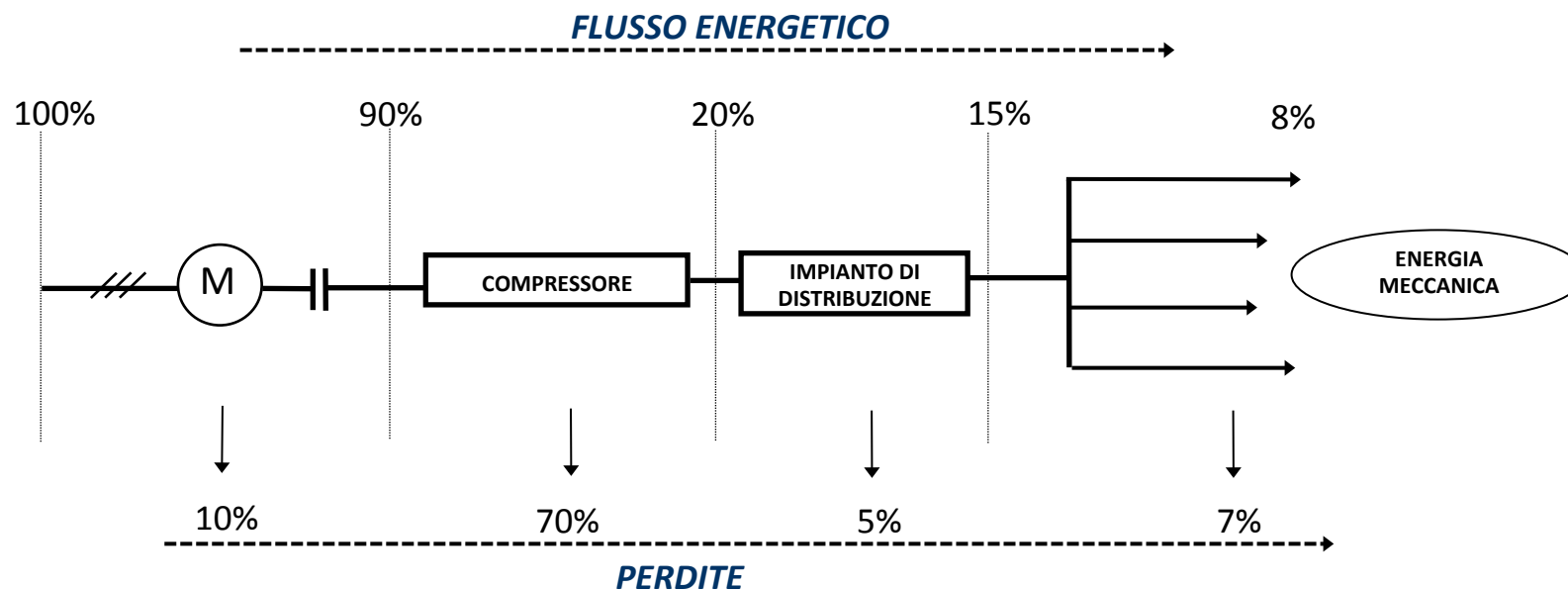
Velocità massima accettabile = 6 m/s

Caduta di pressione $\leq 0,3$ bar

Perdite concentrate: indotte da bruschi cambiamenti di direzione e di sezione.

GESTIONE IMPIANTO ARIA COMPRESSA

CATENA DEI RENDIMENTI NELLA PRODUZIONE DI ARIA COMPRESSA



Per produrre 1 m³ di aria compressa a 8 bar (con rendimento del motore pari a 0,9) si consumano mediamente **0,12 - 0,15 kWh**.

Per produrre 1 m³/min occorre quindi installare **6 - 8 kW**.

ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE

Potenza impegnata per compressione politropica:

se:

M portata massica di aria prodotta

T_1 temperatura dell'aria di ingresso

β rapporto di compressione

m coefficiente della politropica

la potenza di compressione è:

$$P = M \frac{m}{m-1} RT_1 \left(\beta^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right)$$

ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE - **PORTATA**

Uso improprio dell'aria compressa	Alternativa
Ventilazione	Ventilatori, soffianti
Agitazione liquidi	Agitatori meccanici, soffianti
Pulizia in generale	Spazzole elettriche
Allontanamento di prodotti difettosi da una linea di selezione	Braccio meccanico
Trasporto di polveri a bassa pressione	Soffianti



ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE - **PORTATA**

Contenere le perdite

Diametro del foro [mm]	Portata di aria in uscita alla pressione di 7 bar [l/s]	Potenza del compressore dispersa [kW]
1	1,2	0,4
3	11,1	4,0
5	31,0	10,8
10	124,0	43,0

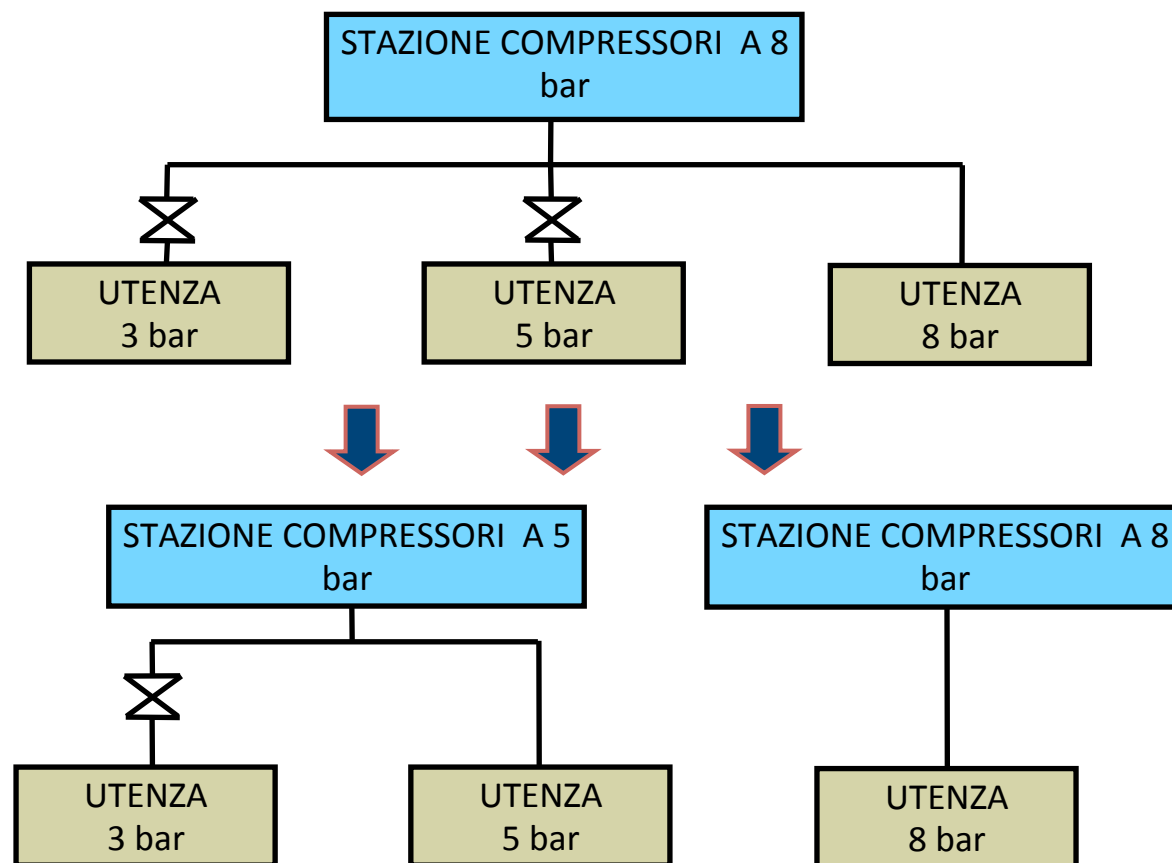
ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE - PORTATA

STRATEGIA DI CONTENIMENTO DELLE PERDITE

- se le perdite hanno bassa entità sono considerate endemiche → si tollerano;
- se l'entità è sensibile, vanno cercate le fughe in autonomia con metodi pratici:
 - con l'udito (a impianti fermi, con basso rumore di fondo),
 - con la 'saponata' (spruzzando le giunzioni a vista con spray saponato ed osservando gli effetti)
- se l'entità è importante, dotarsi di un cercafughe ad ultrasuoni oppure rivolgersi ad una società specializzata.



ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE - **PRESSIONE**



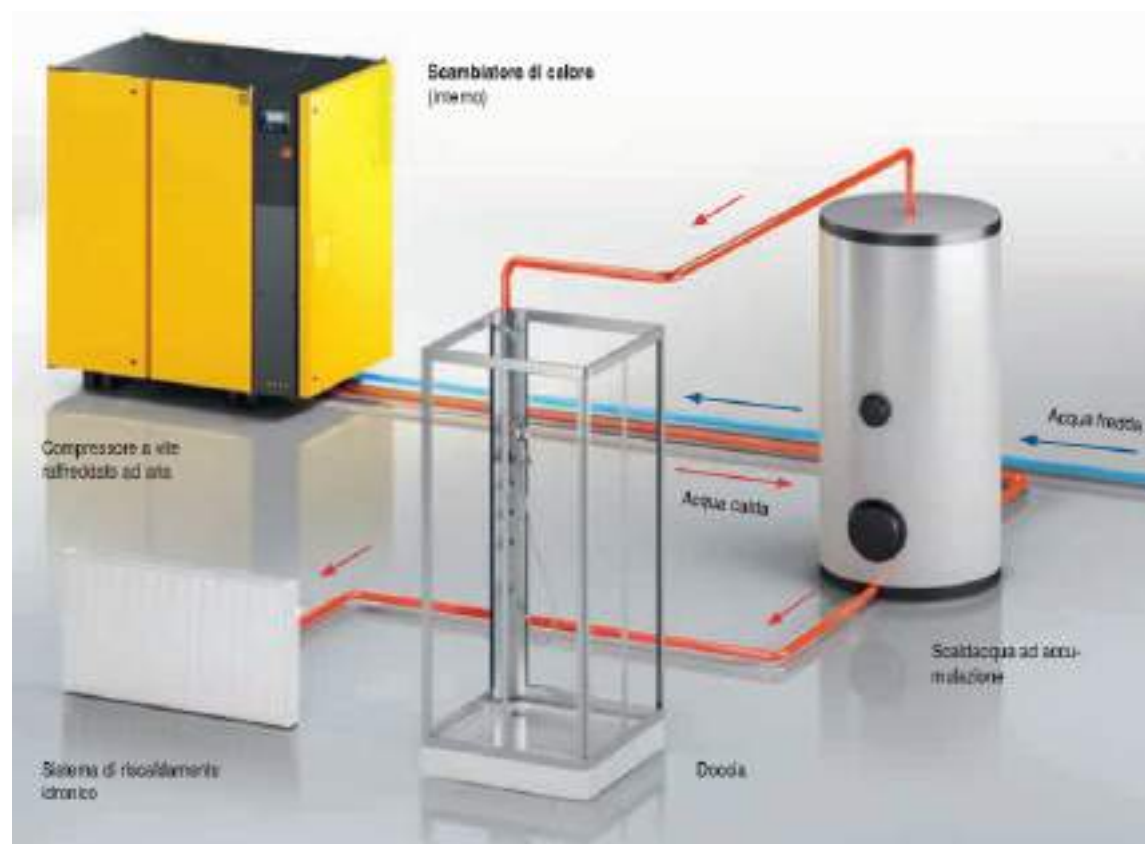
ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE – **TERMODINAMICA**

Recupero del calore di scarto per fabbisogni termici a bassa temperatura



ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE – TERMODINAMICA

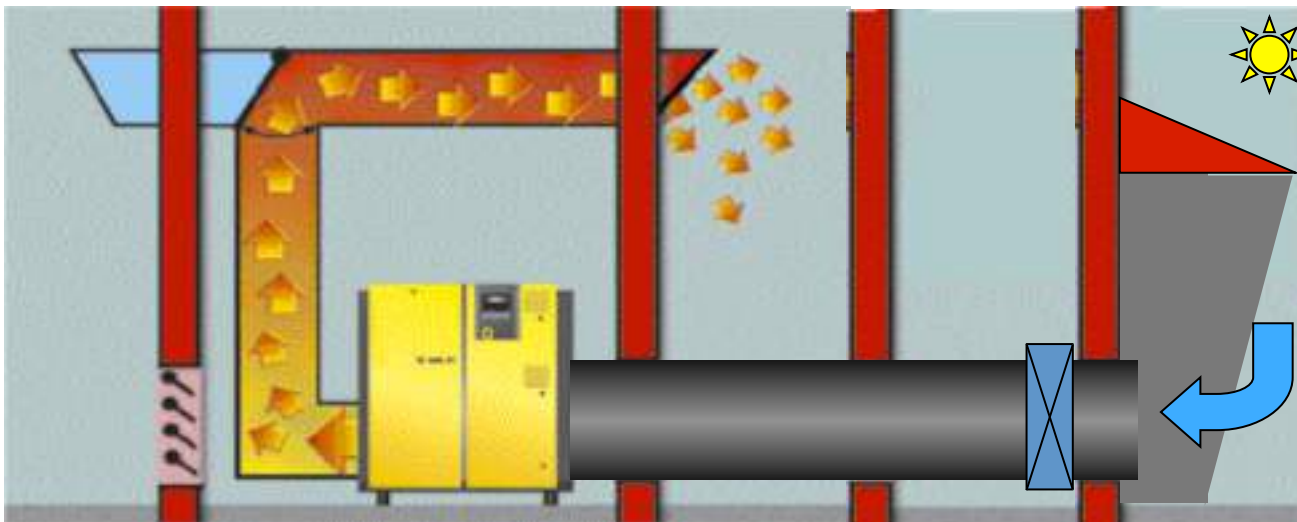
Recupero del calore di scarto per fabbisogni termici a bassa temperatura



ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE - TEMPERATURA ARIA INGRESSO

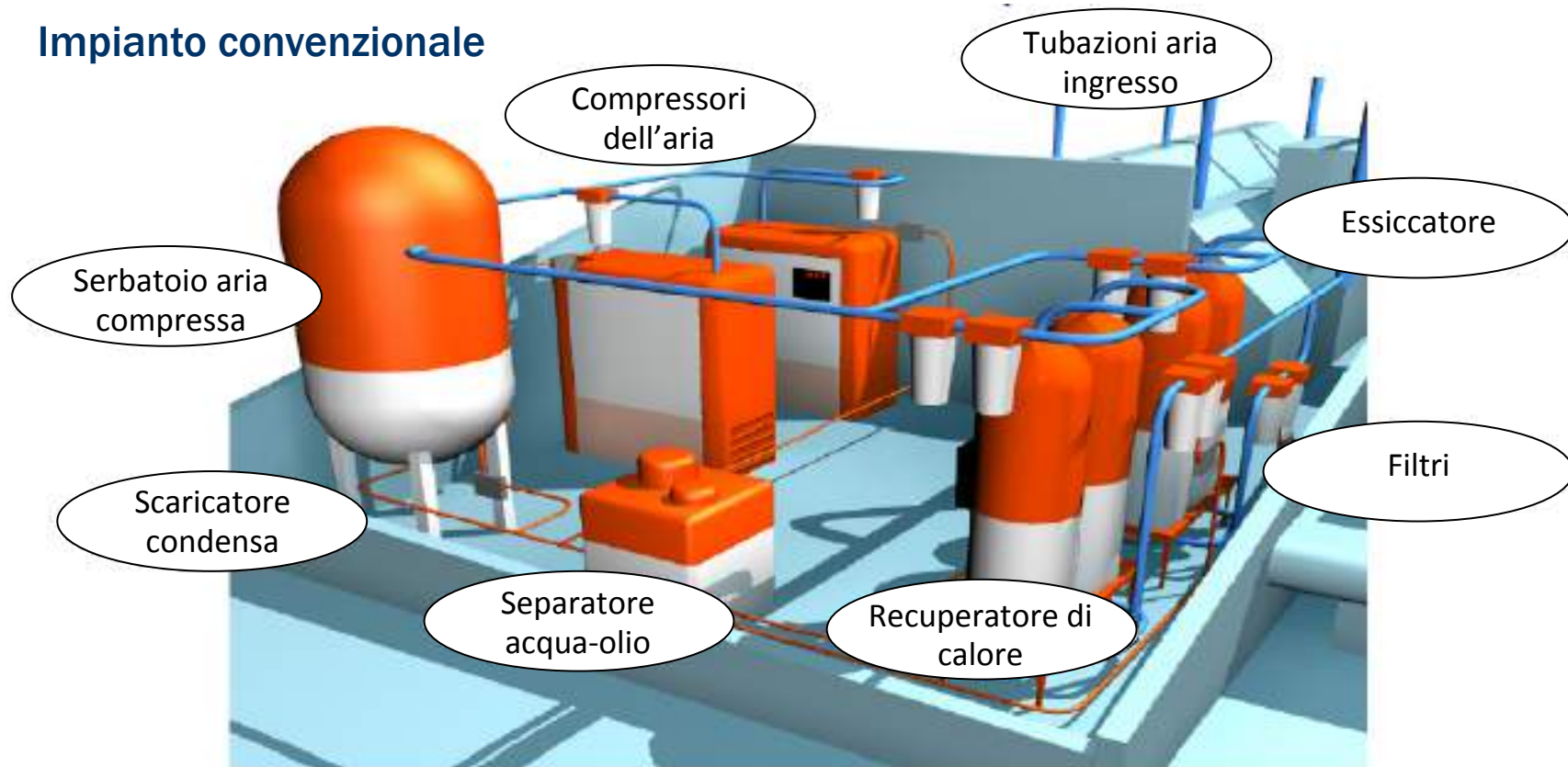
- Spesso le stazioni di compressione sono installate in locali con **scarsi ricambi d'aria** e con alimentazione al compressore di aria locale, normalmente a temperatura elevata poiché nello stesso ambito viene scaricata l'aria calda di raffreddamento dello stesso compressore.
- Intervento: **captazione** di aria esterna, possibilmente dal lato nord e/o da zone ombreggiate, tramite una tubazione dedicata.
- Se lo sviluppo della tubazione dovesse raggiungere le decine di metri, sarà necessaria anche l'interposizione di un **ventilatore**.

ARIA COMPRESSA - INTERVENTI DI RAZIONALIZZAZIONE - **TEMPERATURA ARIA INGRESSO**



CASO STUDIO: PROPOSTA PER NUOVE INSTALLAZIONI

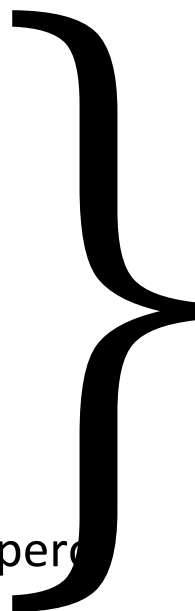
Impianto convenzionale



CASO STUDIO: PROPOSTA PER NUOVE INSTALLAZIONI

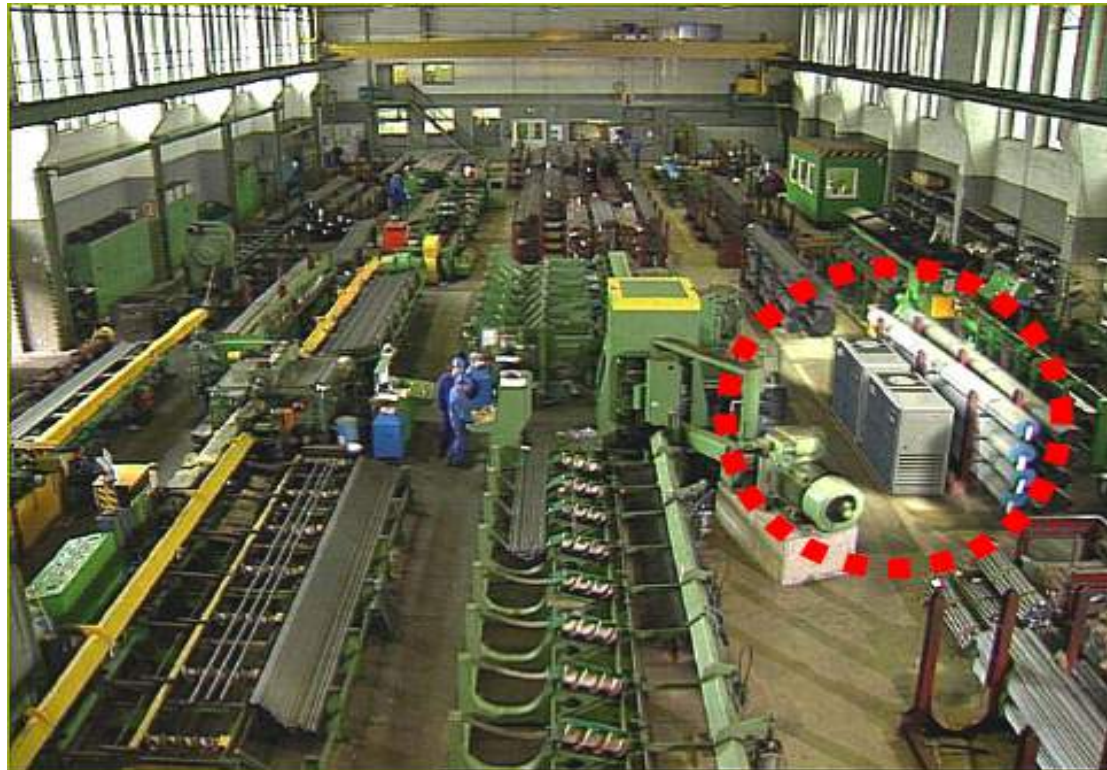
Soluzione innovativa: Impianto Integrato Totalmente Accessoriato

- ✓ Inverter
- ✓ Essiccatore aria
- ✓ Filtri
- ✓ Separatore acqua-olio
- ✓ Scaricatore di condensa
- ✓ Scambiatore di calore a recupero



CASO STUDIO: PROPOSTA PER NUOVE INSTALLAZIONI

Soluzione innovativa: Impianto Integrato Totalmente Accessoriato



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

NINO DI FRANCO
EGE SECEM
UNIVERSITÀ DI PAVIA
pasquale.difranco@unipv.it

