

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'energia

Relazione per la prova finale
«Sostenibilità ed efficienza: installazione
di impianti di microcogenerazione
all'interno di allevamenti bovini»

Tutor universitario: Prof. Andrea Lazzaretto

Laureando: Giacomo Marchetti

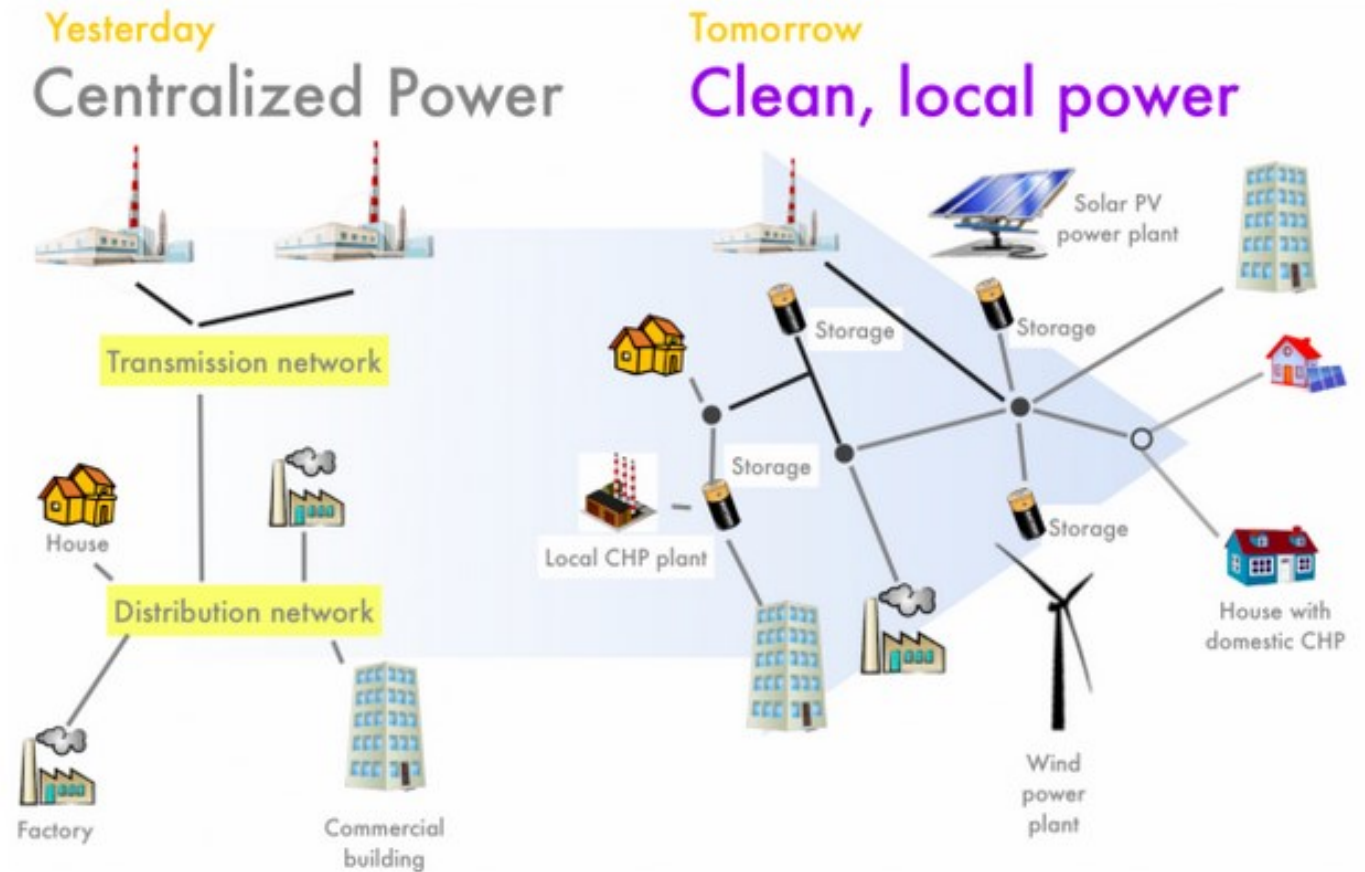
Padova, 14/03/2022

PROBLEMA:

Riscaldamento globale

SOLUZIONI:

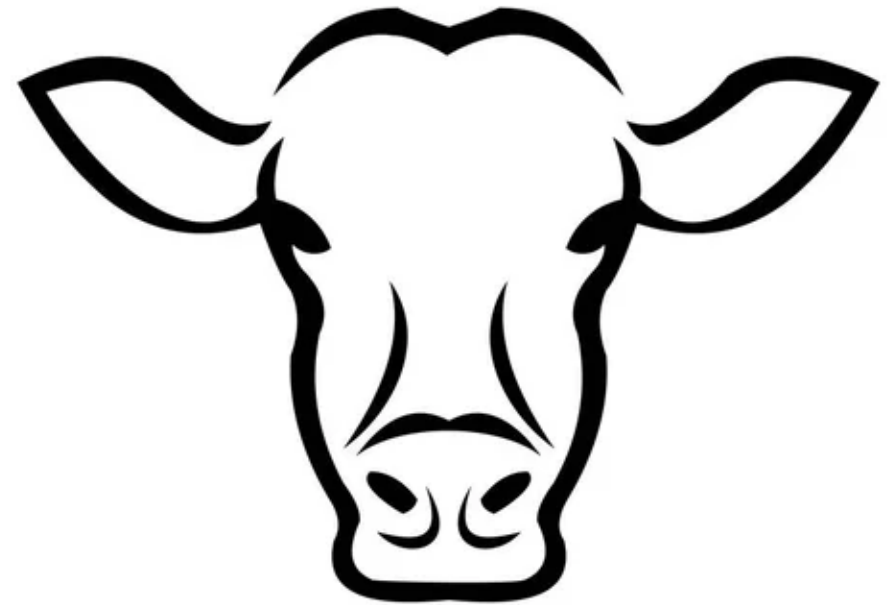
- Riduzione dei consumi energetici
- Generazione green e distribuita:
 - ✓ Fonti rinnovabili
 - ✓ Accumulo
 - ✓ **Cogenerazione**



OBIETTIVI:

Analizzare una possibile installazione di un microgeneratore all'interno di un allevamento di bovini e dimostrarne:

- La convenienza energetica
- La convenienza economica

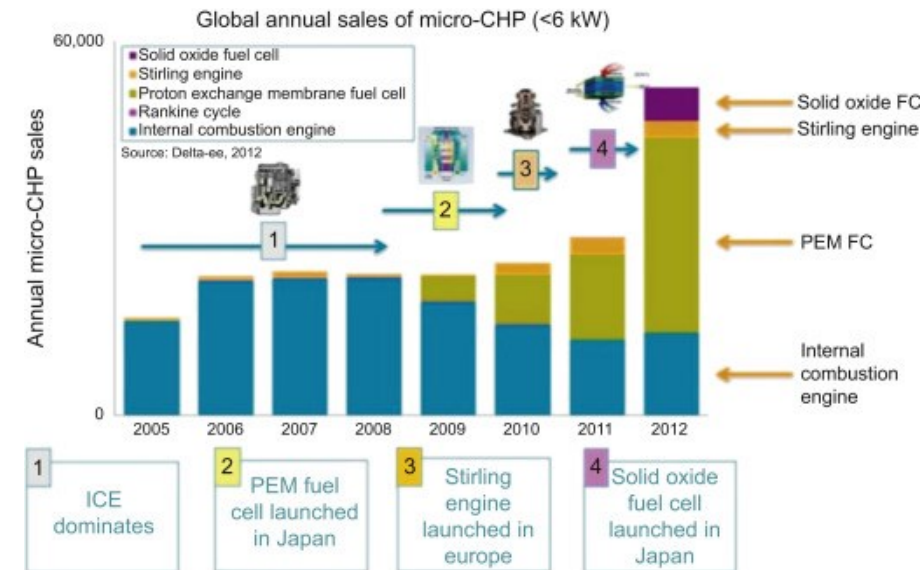


APPLICAZIONI:

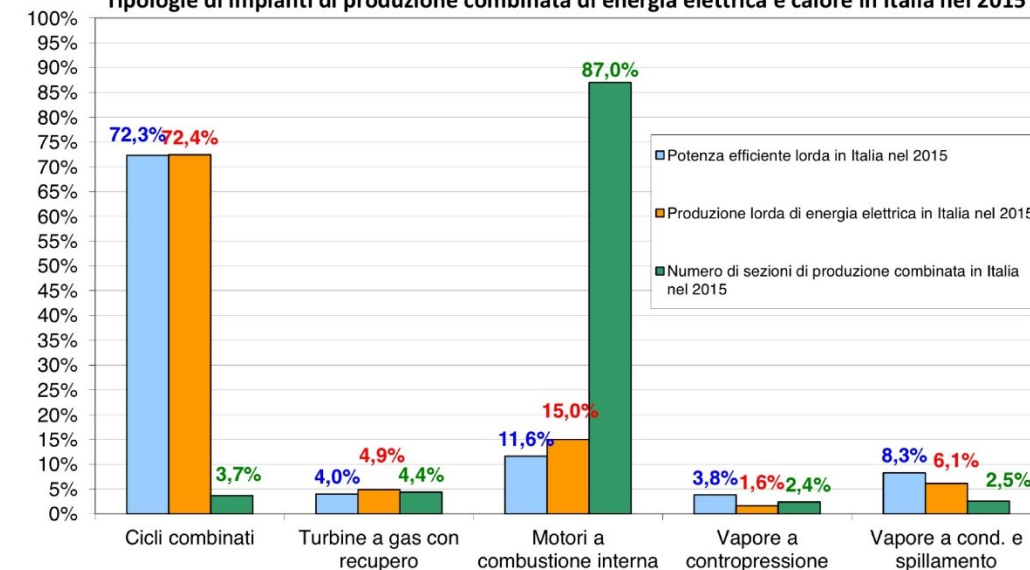
- Piscine
- Ospedali
- Alberghi
- Industrie (cartiere, caseifici, industrie tessili, ...)
- Allevamenti
- Centri commerciali, uffici, condomini

TIPOLOGIE DI MOTORE PRIMO:

- Motori a combustione interna
- Microturbine
- Celle a combustibile
- Motori Stirling



Tipologie di impianti di produzione combinata di energia elettrica e calore in Italia nel 2015



CONFRONTO TRA RENDIMENTI:

$$\eta_e = \frac{E_e}{E_c}$$

$$\eta_t = \frac{E_t}{E_c}$$

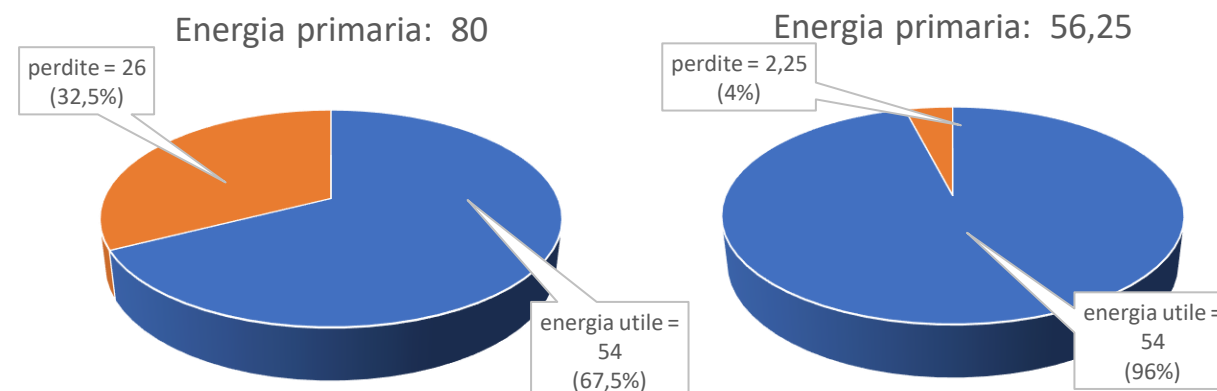
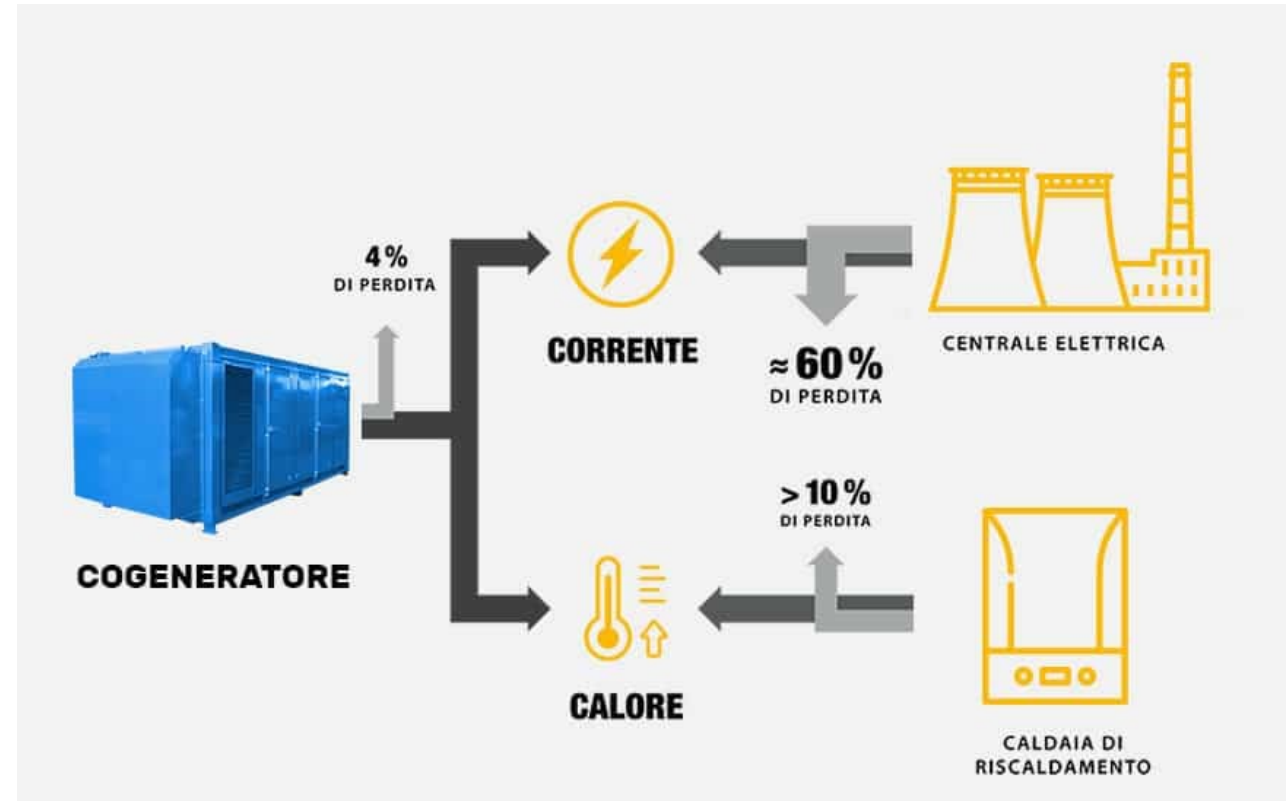
$$\eta_{cog} = \frac{E_{e,cog} + E_{t,cog}}{E_{c,cog}} = \eta_{e,cog} + \eta_{t,cog}$$

Primary Energy Saving:

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

Indice elettrico:

$$I_e = \frac{\text{energia elettrica cogenerata}}{\text{calore cogenerato}}$$



CLASSIFICAZIONE PER POTENZA:

- Piccola cogenerazione $\rightarrow P_e < 1 \text{ MW}$
- Microcogenerazione $\rightarrow P_e < 50 \text{ kW}$

TIPOLOGIE DI MOTORI PRIMI:

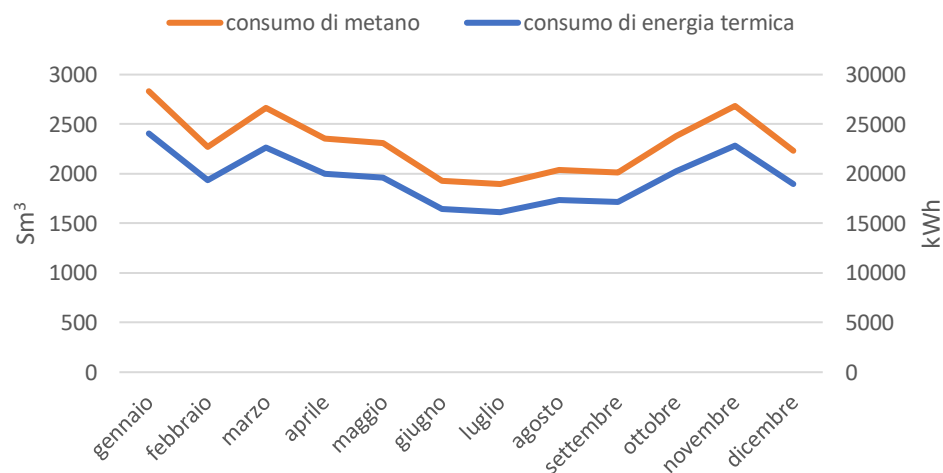
- Motori alternativi endotermici (qualche kW – 10 MW)
- Turbine a gas (0,5 MW – oltre 100 MW)
- Turbine a vapore:
 - a contropressione (1 MW – 30 MW)
 - a spillamento (oltre 30 MW)
- Cicli combinati di turbine a gas e a vapore (oltre 30 MW)
- Celle a combustibile
- Motori stirling



MESE	CONSUMO METANO [Sm3]	ENERGIA RICHIESTA [kWh]
gennaio	2827	24044
febbraio	2271	19315
marzo	2662	22640
aprile	2352	20004
maggio	2305	19604
giugno	1930	16415
luglio	1896	16125
agosto	2035	17308
settembre	2014	17129
ottobre	2380	20242
novembre	2681	22802
dicembre	2228	18949
TOTALE	27581	234577

MESE	CONSUMO F1 [kWh]	CONSUMO F2 [kWh]	CONSUMO F3 [kWh]	TOTALE [kWh]
gennaio	2972	1927	3646	8545
febbraio	2662	1837	3144	7643
marzo	2840	2112	3642	8594
aprile	2844	2069	4127	9040
maggio	3031	2198	3946	9175
giugno	4356	3225	4848	12429
luglio	6372	4341	5908	16621
agosto	5960	4450	6614	17024
settembre	3320	2326	4226	9872
ottobre	3387	2173	3591	9151
novembre	2825	2134	3724	8683
dicembre	3650	2950	4111	10711
TOTALE	44219	31742	51527	127488

CONSUMO DI METANO E DI ENERGIA TERMICA



CONSUMO DI ENERGIA ELETTRICA

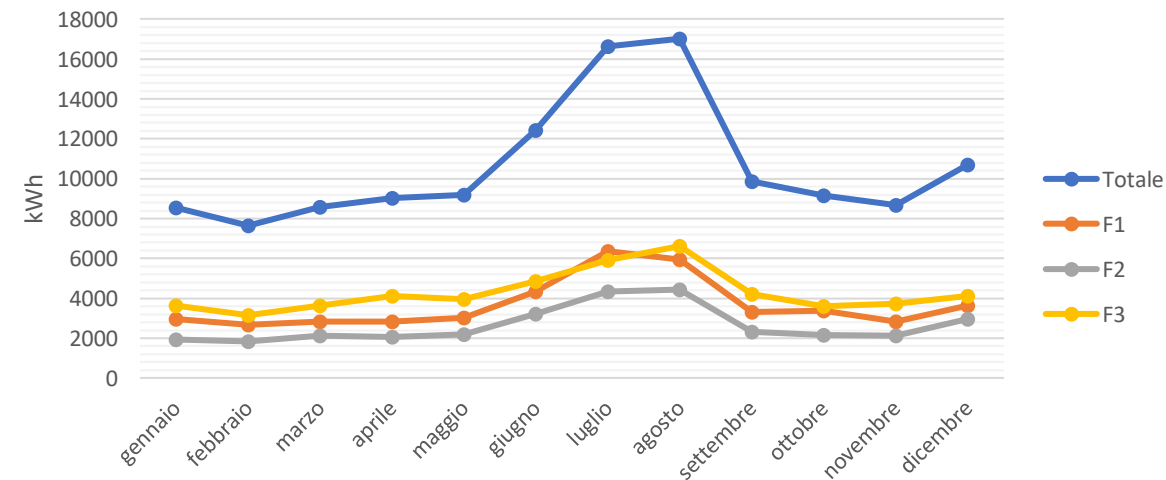


DIAGRAMMA DI CARICO GIORNALIERO RELATIVO AL
CONSUMO DI GAS METANO

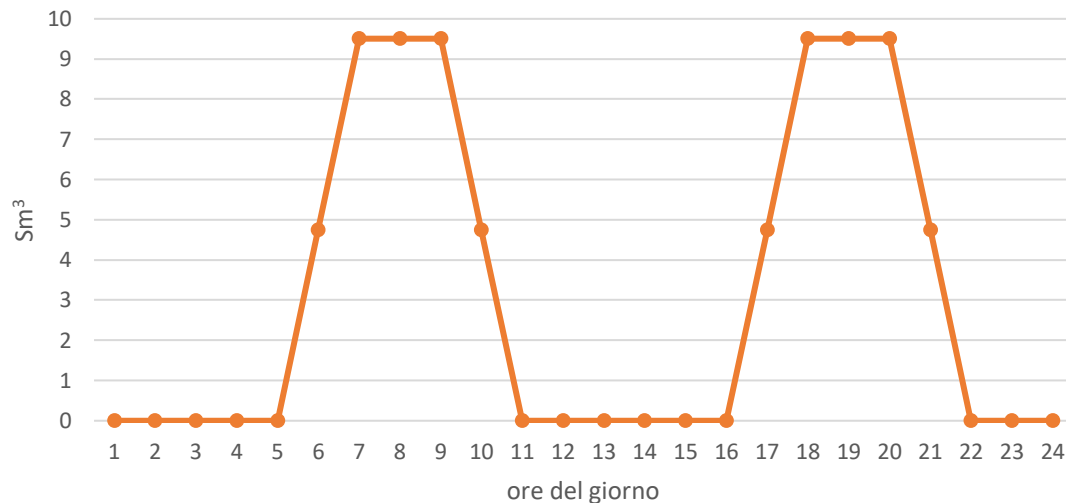
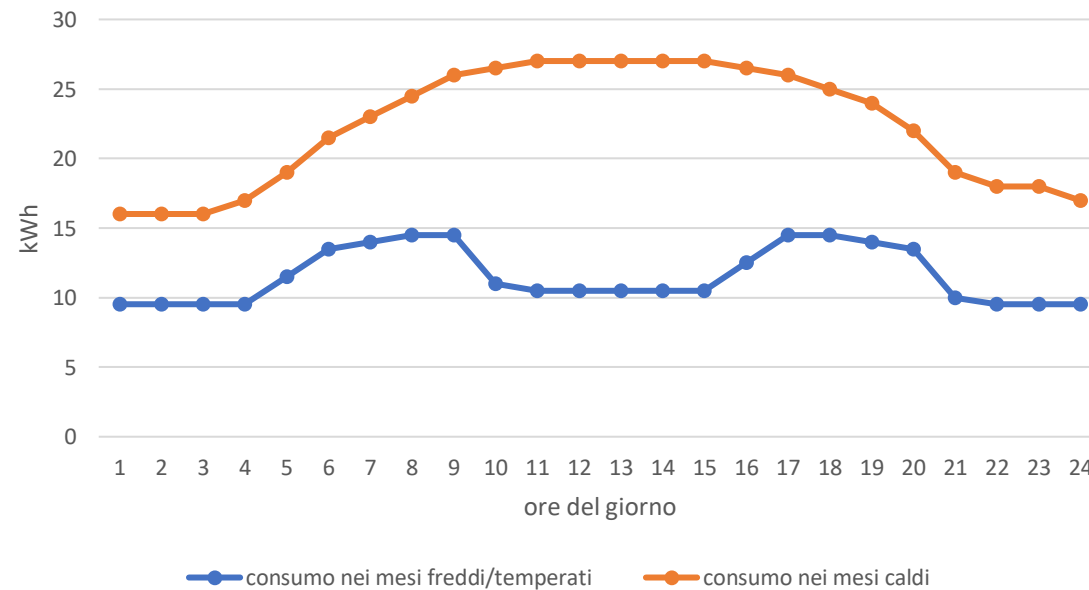


DIAGRAMMA DI CARICO GIORNALIERO RELATIVO AL
CONSUMO DI ENERGIA ELETTRICA



● consumo nei mesi freddi/temperati ● consumo nei mesi caldi

$$P_{t,min} = \frac{1896[Sm^3] \cdot 9,45 \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \cdot 0,9}{31[gg] \cdot 24 \left[\frac{h}{gg} \right]} = 21,67 \text{ kW}$$

$$P_{t,max} = \frac{2827[Sm^3] \cdot 9,45 \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \cdot 0,9}{31[gg] \cdot 24 \left[\frac{h}{gg} \right]} = 32,32 \text{ kW}$$

$$P_{e,F1} = \frac{2840[kWh]}{242[h]} = 11,74 \text{ kW}$$

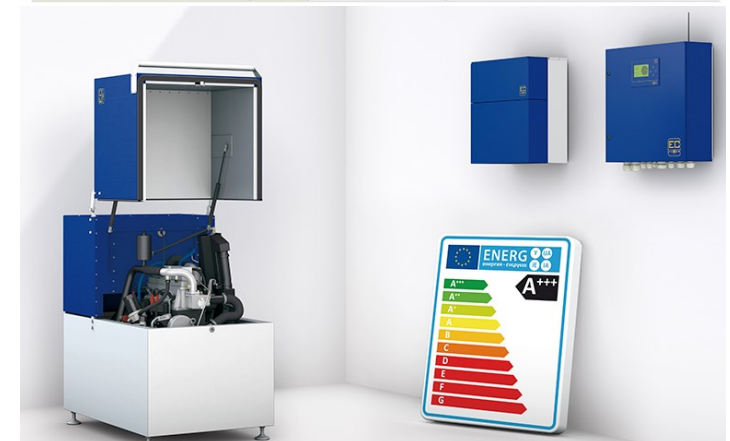
$$P_{e,F2} = \frac{2112[kWh]}{174[h]} = 12,14 \text{ kW}$$

$$P_{e,F3} = \frac{3642[kWh]}{328[h]} = 11,10 \text{ kW}$$

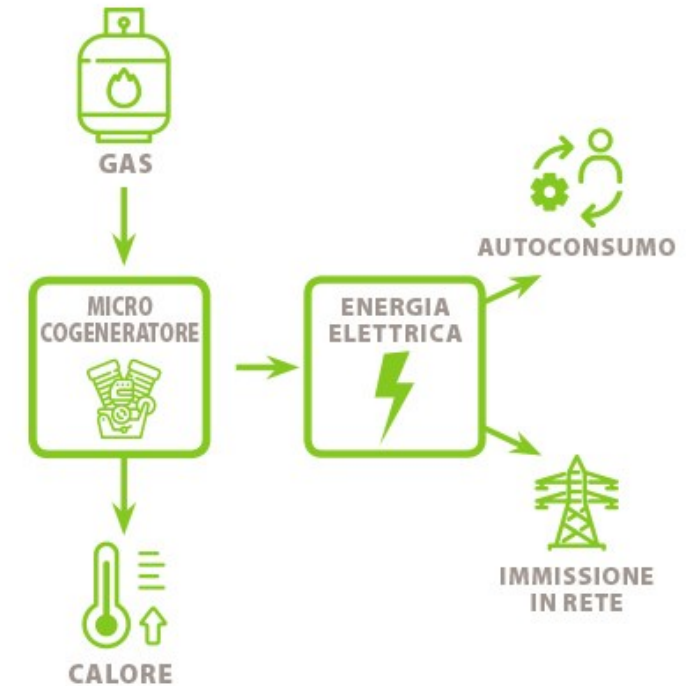
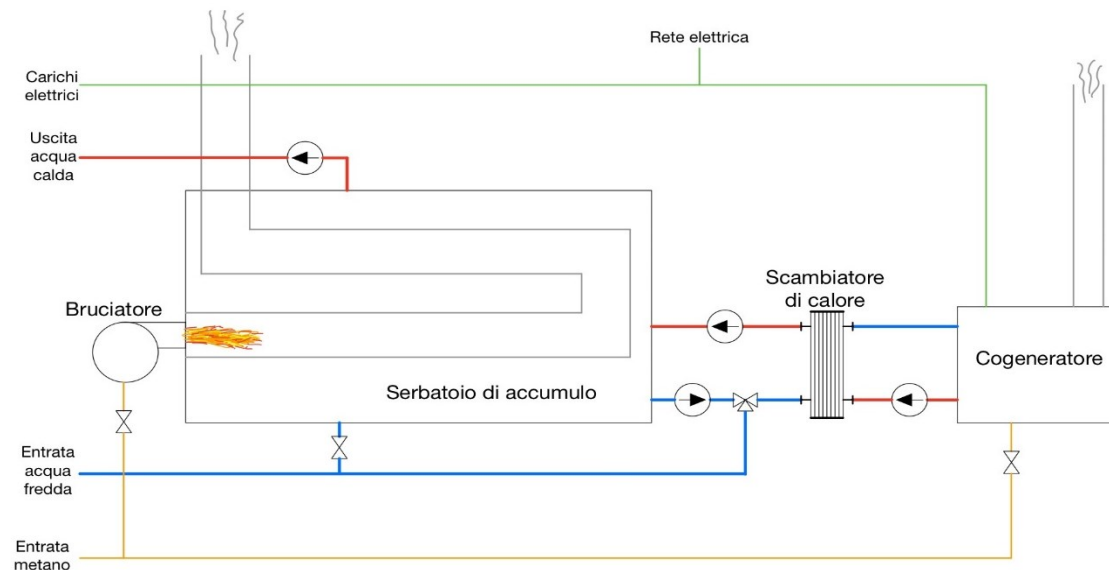
15kW_e 30,6 kW_t

SCHEDA TECNICA 15-20 kW

Modello		XRG^e 15 <small>Base</small>	XRG^e 15 <small>Low NOx</small>	XRG^e 20 <small>Base</small>
Potenza elettrica nominale	kW	7,3 - 14,5	10 - 15	10 - 20
Tensione in uscita	V	400 trifase senza neutro		
Tensione	V	400 trifase con neutro		
Frequenza	Hz	50		
Rendimento elettrico	%	29,5	30,5	32,7
Funzionamento		Interconnessione in parallelo con rete elettrica		
Potenza termica nominale	kW	21,4 - 30,8	20,6 - 30,6	26,1 - 38,7
Temperatura massima ritorno acqua	°C	75		
Temperatura massima mandata acqua	°C	85		
Rendimento termico	%	62,3	61,8	63,4
Tipo di gas di alimentazione		Metano - GPL		
Consumo nominale gas alimentazione	kW	49,4	49,5	61,1
Rendimento globale	%	91,8	92,3	96,1
Motore	Tipo	TOYOTA 4 cilindri raffreddato a liquido		
	Cilindrata	cm ³ 2.237		
	Numero giri	rpm 1.500		
	Emissioni CO	mg/m ³ 93	10	15
	Emissioni NO _x	mg/m ³ 205	33	16
Generatore	Tipo	Asincrono 4 poli		
	Raffreddamento	A liquido		
Dimensioni	Lunghezza	mm 1.120		
	Altezza	mm 1.170		
	Profondità	mm 750		
	Peso	kg 580	750	
Intervallo di manutenzione	ore	8.500	6.000	
Rumorosità	dB(A)	53	49	



- Motore a combustione interna alimentato a gas metano (2237 cc) con consumo orario di 6,5 m³
- Generatore asincrono a 4 poli
- Energia termica recuperata da:
 - recupero ad alta temperatura dai fumi di scarico (~ 450 °C)
 - recupero a media temperatura dal liquido di raffreddamento del corpo motore e dell'olio (70-85 °C)
 - recupero a bassa temperatura dalle dispersioni per irraggiamento e per convezione all'interno del cassone di contenimento acustico del motore (45 °C)



Prezzi dell'energia elettrica per usi industriali nel 2020 (prezzi al netto e al lordo delle imposte, in c€/kWh)

PAESI	CONSUMATORI PER FASCIA DI CONSUMO ANNUO (MWh)											
	< 20		20-500		500-2.000		2.000-20.000		20.000-70.000		70.000-150.000	
	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI
Austria	12,63	19,60	10,36	16,19	8,74	14,25	7,26	11,97	6,62	10,83	6,02	9,89
Belgio	17,90	27,08	11,18	18,47	8,03	14,17	7,16	11,93	5,62	9,22	5,21	7,71
Bulgaria	10,14	12,29	9,34	11,34	8,19	9,95	7,75	9,43	7,18	8,74	6,37	7,77
Cipro	13,73	19,54	12,44	17,95	11,37	16,57	10,95	15,86	10,54	15,00	5,05	7,49
Cechia	18,03	24,19	12,43	17,08	7,15	10,21	7,16	9,86	6,85	9,23	6,31	8,48
Croazia	12,83	16,15	10,66	13,69	8,88	11,68	8,07	10,67	7,34	9,64	6,11	7,50
Danimarca	9,73	28,59	7,94	25,73	5,78	23,01	5,97	23,23	5,03	22,05	4,76	21,72
Estonia	9,96	13,59	7,80	10,99	7,13	10,18	6,19	9,04	5,42	8,09	5,39	8,12
Finlandia	9,27	12,37	8,17	10,99	6,57	9,02	6,16	8,51	4,66	6,65	4,38	6,30
Francia	13,65	20,46	10,50	16,09	8,01	12,04	6,87	9,90	6,12	8,29	5,41	7,01
Germania	13,58	29,00	10,04	23,91	8,67	21,81	7,19	19,11	5,67	16,10	4,62	14,25
Grecia	12,79	17,81	10,50	15,14	8,16	11,32	7,21	9,71	6,99	8,49	n.d.	n.d.
Irlanda	20,19	25,83	15,71	18,88	13,29	15,90	10,19	12,04	9,04	10,41	8,09	9,61
Italia	16,86	33,63	9,85	20,25	8,67	17,46	8,25	14,53	7,40	10,82	6,48	8,10
Lettonia	14,86	23,17	10,32	15,51	8,26	12,61	6,81	10,49	5,79	9,20	4,92	8,14
Lituania	13,15	17,11	9,99	13,42	8,86	11,92	7,39	10,26	6,82	9,41	6,83	9,44
Lussemburgo	12,66	17,69	10,00	12,68	8,28	10,15	6,02	7,13	4,58	5,17	n.d.	n.d.
Malta	23,95	25,30	15,03	15,94	13,30	14,12	11,69	12,43	10,32	10,99	10,11	10,77
Paesi Bassi	n.d.	n.d.	8,15	15,98	6,89	12,72	6,36	11,86	6,03	8,23	5,97	7,67
Polonia	13,43	20,46	10,25	16,08	7,92	13,31	7,03	11,95	6,33	10,86	5,37	9,82
Portogallo	12,93	23,48	9,97	17,31	7,88	13,63	7,21	12,41	6,05	10,28	5,32	9,00
Romania	10,95	15,11	10,07	14,06	8,69	12,39	8,07	11,61	7,35	10,60	7,24	10,34
Slovacchia	18,79	26,67	12,00	18,53	9,75	15,82	8,96	14,88	7,84	13,53	6,62	12,07
Slovenia	11,67	17,72	9,82	14,11	8,10	11,96	7,33	10,45	6,49	8,90	5,89	8,01
Spagna	17,03	29,86	10,00	17,79	8,34	13,62	6,51	10,17	6,11	8,67	5,37	7,64
Svezia	14,12	17,48	7,24	10,61	6,12	9,49	5,48	8,85	4,83	8,20	4,50	7,87
Ungheria	n.d.	16,31	10,17	14,20	8,41	11,97	7,72	11,09	6,74	9,85	6,38	9,38
Unione europea	14,40	24,95	10,04	18,32	8,20	15,30	7,16	13,17	6,26	11,01	5,51	9,68
Area euro	14,68	26,43	10,15	19,22	8,40	16,10	7,23	13,64	6,28	11,15	5,49	9,66
Norvegia	4,33	7,47	4,07	6,25	4,05	6,19	3,03	4,91	2,28	3,98	1,53	1,91

Fonte: ARERA, elaborazione su dati Eurostat.

Prezzi del gas naturale per usi industriali nel 2020 (prezzi al netto e al lordo delle imposte, in c€/m3)

PAESI	CONSUMATORI PER FASCIA DI CONSUMO ANNUO (migliaia di m3)									
	< 26		26-260		260-2.600		2.600-26.000		26.000-104.000	
	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI	NETTI	LORDI
Austria	43,37	60,35	34,44	49,46	25,49	38,29	18,75	30,04	19,33	30,65
Belgio	37,62	47,96	25,83	33,49	20,3	26,44	16,79	21,64	14,19	17,98
Bulgaria	31,99	39,77	28,41	35,48	21,8	27,47	16,67	20,73	15,72	19,05
Cechia	33,81	42,51	28,44	36,01	25,44	32,38	21,34	27,42	19,01	24,6
Croazia	36,1	47,07	30,68	39,76	27,83	36,33	24,72	31,99	n.d.	n.d.
Danimarca	28,62	77,2	29,85	79,06	19,4	63,92	16,21	59,63	15,97	59,15
Estonia	29,2	41,22	26,36	37,83	24,06	34,33	21,25	29,32	n.d.	n.d.
Finlandia	45,44	80,77	44,67	79,82	33,34	65,75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Francia	48,49	68,28	38,86	56,42	28,98	42,74	19,57	25,98	13,38	16,36
Germania	40,57	55,16	33,28	46,38	25,87	37,36	20,26	30,68	15,32	24,85
Grecia	41,58	50,36	30,54	37,5	21,88	26,4	18,91	21,83	0	0
Irlanda	49,61	61,17	36,88	46,74	27,41	34,64	20,93	24,35	n.d.	n.d.
Italia	46,78	73,19	33,75	52,49	25,85	33,8	21,61	25,68	19,62	22,97
Lettonia	32,17	41,08	28,38	36,29	23,6	30,03	19,74	25,7	n.d.	n.d.
Lituania	21,25	30,46	22,62	32,07	19,5	27,32	17,37	24,15	n.d.	n.d.
Lussemburgo	39,69	44,15	37,1	40,81	30,63	33,63	19,43	21,1	n.d.	n.d.
Paesi Bassi	n.d.	n.d.	27,59	87,16	20,32	44,06	17,74	29,11	14,51	22,51
Polonia	41,42	52,22	36,68	46,37	30,11	38,28	23,6	29,98	18,15	22,86
Portogallo	50,41	75,72	36,38	52,35	25,81	34,1	22,63	28,23	19,78	24,4
Romania	34,82	42,42	31,85	38,91	28,13	34,27	22,37	27,36	18,85	22,69
Slovacchia	45,38	56,13	37,69	46,9	31,69	39,71	25,48	32,25	23,25	29,58
Slovenia	40,87	57,68	36,01	51,51	26,76	39,33	23,08	32	n.d.	n.d.
Spagna	36,64	48,25	33,42	43,54	25,73	33,34	21,28	27,84	18,76	24,62
Svezia	55,08	82,06	44,54	68,87	30,86	51,77	24,77	44,16	22,25	41,01
Ungheria	28,55	38,41	27,15	36,67	23,94	32,68	19,95	27,54	18,77	25,64
Unione europea(A)	41,42	61,6	33,21	50,77	25,73	37,02	20,32	28,16	16,58	23,01
Area euro	42,42	64,04	33,43	52,13	25,53	37,08	20,08	27,8	16,22	22,48

(A) I dati di Cipro e Malta non sono disponibili e quindi non sono presenti nella tavola.

Fonte: ARERA, elaborazione su dati Eurostat

$$\text{costo elettricità annuo} = 127488 \cdot 0,15795 = 20137 \text{ €}$$

$$\text{costo metano annuo} = 27581 \cdot 0,40942 = 11292 \text{ €}$$

$$\text{costo totale annuo} = 31429 \text{ €}$$

METANO:

$$8784 - 1186,4 = 7597,6 h$$

$$7597,6 \cdot 6,5 = 49384,4 m^3$$

$$3,3 \cdot 7597,6 \cdot 0,3375 = 8461,8 \text{ €}$$

$$3,2 \cdot 7597,6 \cdot 0,40942 = 9953,9 \text{ €}$$

$$\frac{2048}{0,9 \cdot 9,45} \cdot 0,40942 = 98,6 \text{ €}$$

$$18514,3 \text{ €}$$

ENERGIA ELETTRICA:

$$24551 \cdot 0,15795 = 3877,8 \text{ €}$$

$$11028 \cdot 0,04 = 441,1 \text{ €}$$

$$3436,7 \text{ €}$$

	ore	energia termica richiesta [kWh]	energia termica massima fornita dal cogeneratore [kWh]	esuberi o carenze di energia termica [kWh]	ipotetico grado di carico	ore di fermo macchina	energia elettrica richiesta [kWh]	energia elettrica prodotta a funz. ridotto [kWh]	esuberi o carenze di energia elettrica [kWh]
gennaio	744	24044	22766	-1278	100%	0	8545	11160	2615
febbraio	696	19315	21298	1983	90,7%	64,7	7643	9470	1827
marzo	744	22640	22766	126	99,4%	4,5	8594	11093	2499
aprile	720	20004	22032	2028	90,8%	66,2	9040	9806	766
maggio	744	19604	22766	3162	86,1%	103,4	9175	9609	434
giugno	720	16415	22032	5617	74,5%	183,6	12429	8046	-4383
luglio	744	16125	22766	6641	70,8%	217,2	16621	7901	-8720
agosto	744	17308	22766	5458	76%	178,6	17024	8482	-8542
settembre	720	17129	22032	4903	77,7%	160,6	9872	8392	-1480
ottobre	744	20242	22766	2524	88,9%	82,6	9151	9921	770
novembre	720	22802	22032	-770	100%	0	8683	10800	2117
dicembre	744	18949	22766	3817	83,2%	125	10711	9285	-1426
		234577		36259		1186,4	127488	113965	11028
				-2048					-24551

INVESTIMENTO INIZIALE: $53500 \cdot 1,15 = 61525 \text{ €}$

MANUTENZIONE: $\frac{1700 \cdot 7597,6}{6000} = 2152,7 \text{ €}$

CERTIFICATI BIANCHI: $250 \cdot 7 = 1750 \text{ €}$

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{CHP H\eta}{Ref H\eta} + \frac{CHP E\eta}{Ref E\eta}} \right) \cdot 100\% = 4,88\%$$

$$RISP = \frac{E_{CHP}}{\eta E RIF} + \frac{H_{CHP}}{\eta T RIF} - F_{CHP} = 59,2$$

$$CB = RISP \cdot 0,086 \cdot K \cong 7$$

SPESE COMPLESSIVE PRIMI 10 ANNI: $18514,3 + 3436,7 + 2152,7 - 1750 = 22353,7 \text{ €}$

$31429 - 22353,7 = 9075,3 \text{ €}$ (risparmio del 28,9%)

SPESE COMPLESSIVE ULTIMI 5 ANNI: $18514,3 + 3436,7 + 2152,7 = 24103,7 \text{ €}$

$31429 - 24103,7 = 7325,3 \text{ €}$ (risparmio del 23,3%)



TEMPO DI RITORNO: $N = \frac{61525}{9075,3} = 6,78 \text{ anni}$

TEMPO DI RITORNO ATTUALIZZATO: $P = F \cdot \frac{(1 + a)^N - 1}{a \cdot (1 + a)^N} \rightarrow N = 10,15 \text{ anni}$
(tasso di attualizzazione: 8%)

VALORE ATTUALE NETTO: $VAN = \sum_{n=1}^{10} \frac{R_{annuo,A}}{(1 + i)^n} + \sum_{n=11}^{15} \frac{R_{annuo,B}}{(1 + i)^n} - I_0 = 17484,5 \text{ €}$
(tasso di interesse: 7%)

BENEFICI E VANTAGGI:

- ✓ Risparmio economico
- ✓ Risparmio energetico
- ✓ Riduzione delle emissioni di gas serra e inquinanti in atmosfera
- ✓ Riduzione delle emissioni di calore in atmosfera
- ✓ Minor dipendenza dalla rete elettrica
- ✓ Annullamento delle perdite in rete per il trasporto dell'energia elettrica

