



Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria ed Architettura

Introduzione al corso Energia: risorse, trasformazioni ed usi finali

R. Taccani

**Corso di Impiego industriale dell'energia
BOZZA AA 2023-2024**



Informazioni sul corso

■ **Docente**

Rodolfo Taccani

Ufficio Ed. C7 2° P, tel. 040 5583806

Ricevimento martedì 9-11 (mandare in ogni caso una mail) e su appuntamento
taccani@units.it

■ **Appelli**

Appelli regolari + 1 appello straordinario mensile per iscritti fuoricorso e ripetenti (tranne agosto). Gli studenti che rifiutano il voto non potranno presentarsi all'appello immediatamente successivo nella stessa sessione di esami. Tutti gli appelli sono pubblicati su esse3. Gli appelli straordinari vanno richiesti via e-mail e vengono pubblicati su esse 3 circa 2 settimane prima dell'esame.

Normalmente non vengono fatti più di 4 esami al giorno. Pertanto, per liste lunghe, prevedere che l'esame potrà essere fatto anche diversi giorni dopo la data dell'appello.



Informazioni sul corso

- **Orario lezioni**

- Martedì 11.15 13.00

- Mercoledì 08.40 11.00

- **Modalità d'esame**

L'esame consisterà in una prova orale. Normalmente 3 domande che possono riguardare anche le esercitazioni.

Materiale

Presentazioni Power Point che sono disponibili su Moodle. Le presentazioni caricate all'inizio del corso possono essere leggermente diverse da quelle alla fine in quanto vengono di anno in anno aggiornate. Assicurarsi di studiare sulle versioni disponibili alla fine del corso.

Testo dal quale viene tratto circa il 50% del corso:

G. Lozza: Turbine a gas e cicli combinati - Progetto Leonardo, Esculapio Editore, Bologna

Note su alcuni specifici argomenti verranno distribuite su file pdf.



Informazioni sul corso

■ **Libri consigliati**

- A. Cavallini, L. Mattarolo: Termodinamica Applicata CLUEP Editore
- G. Lozza: Turbine a gas e cicli combinati - Progetto Leonardo, Esculapio Editore, Bologna
- E. Macchi, S. Consonni, S. Paolo: La microgenerazione a gas naturale - ed. Polipress
- W.F. Stoecker, Design of Thermal System, McGraw- Hill, 1989.
- G. Cornetti, Fondamenti di macchine – ed. Il Capitello.



Programma 2022-23

1. Introduzione. Criteri generali di valutazione dei processi energetici.

Introduzione al corso. Fonti energetiche e consumi energetici.

Studio dei processi mediante il I° e il II° principio della termodinamica: bilanci generali di I° e II° principio e relativi rendimenti, analisi delle irreversibilità con esempi di applicazione ai processi reali più significativi, contenuto exergetico dei combustibili.

Analisi economica dei processi energetici: struttura dei costi di produzione dell'energia, relazioni tra l'efficienza termodinamica e l'efficienza economica, approccio generale di ottimizzazione dei costi dei componenti in relazione alle variabili energetiche a loro connessi, esempi applicativi.

2. Impianti a vapore

Richiami: ciclo termodinamico, componenti principali, rendimento. Cicli Rankine a fluido organico.

3. Motori a combustione interna

Cenni: ciclo termodinamico, componenti principali, rendimento

4. Turbine a gas

Ciclo termodinamico. Rendimento ideale e reale. Componenti: compressore, turbina, camera di combustione. Cenni al comportamento fuori progetto, influenza delle condizioni ambientali. Temperature massime raggiungibili e raffreddamento delle pale, tipologie, prestazioni delle macchine presenti sul mercato, regolazione.

Microturbine a gas

5. Cicli combinati

I cicli combinati gas/vapore. Aspetti termodinamici, assetto dei cicli multipressione, ottimizzazione delle caldaie a recupero, prestazioni, regolazione, cenni al repowering.



Programma 2022-23

6. Elementi fondamentali sulle emissioni dai processi di combustione

Tipi di inquinanti emessi, cenni ai meccanismi di formazione, sistemi di rimozione e loro efficienza attese, conversione tra le varie unità di misura delle emissioni per il confronto con i valori di norma.

7. Macchine frigorifere ad assorbimento

Schema di funzionamento, caratteristiche, confronto con i frigoriferi a compressione, settori di utilizzo.

8. Celle a combustibile

Principio di funzionamento, tipologie, rendimento, applicazioni.

9. Cogenerazione e trigenerazione

Fondamenti termodinamici e motivazioni della superiorità termodinamica della produzione termica in cogenerazione rispetto alla produzione indipendente. Il comportamento degli impianti in modalità cogenerativa: regolazione e soddisfacimento dei carichi elettrici e termici con macchine a vapore, turbine a gas in ciclo semplice, cicli combinati e motori alternativi.



Programma 2022-23

- **Esercitazioni**

Il corso comprende alcune esercitazioni di carattere monografico, consistenti in applicazioni numeriche e progetti riguardanti i temi di maggior rilievo trattati nel programma (dimensionamento e ottimizzazione di componenti di rilievo, analisi di processi termodinamici di produzione dell'energia, analisi tecnica ed economica di impianti di cogenerazione). Vengono inoltre svolte delle esercitazioni numeriche utilizzando SW come Matlab, EES e Aspen.

- **Laboratorio**

Il corso include delle esercitazioni pratiche che riguardano la caratterizzazione sperimentale di celle a combustibile e/o altri impianti. Dette esercitazioni potranno essere sostituite con altre equivalenti a seconda della disponibilità dell'attrezzatura sperimentale.

- **Visite Tecniche**

Sono previste le seguenti visite tecniche

Centrale termoelettrica Monfalcone

Servola S.p.A. (Ferriera)

o ad altri impianti in sostituzione a quelli citati.

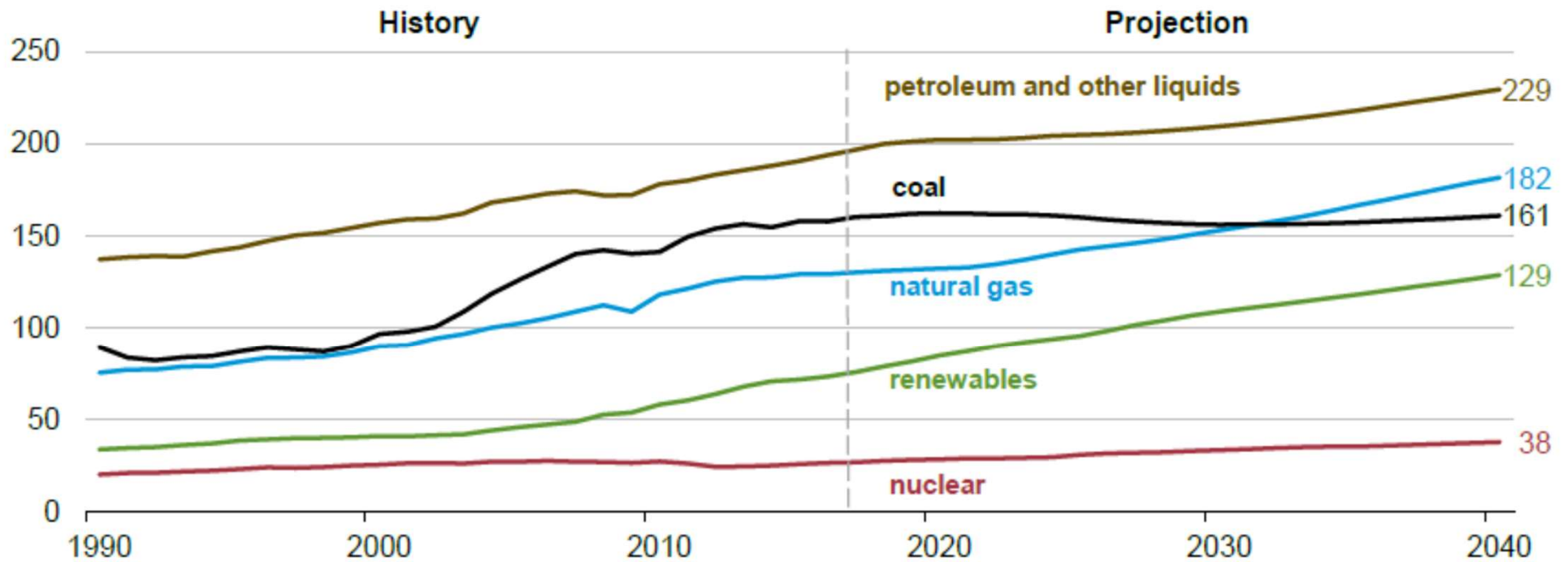
Domanda di energia mondiale

World energy consumption increases for fuels other than coal

IEO2018 Reference case

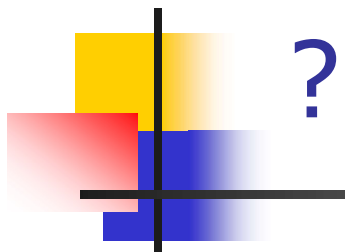
world energy consumption by energy source

quadrillion Btu



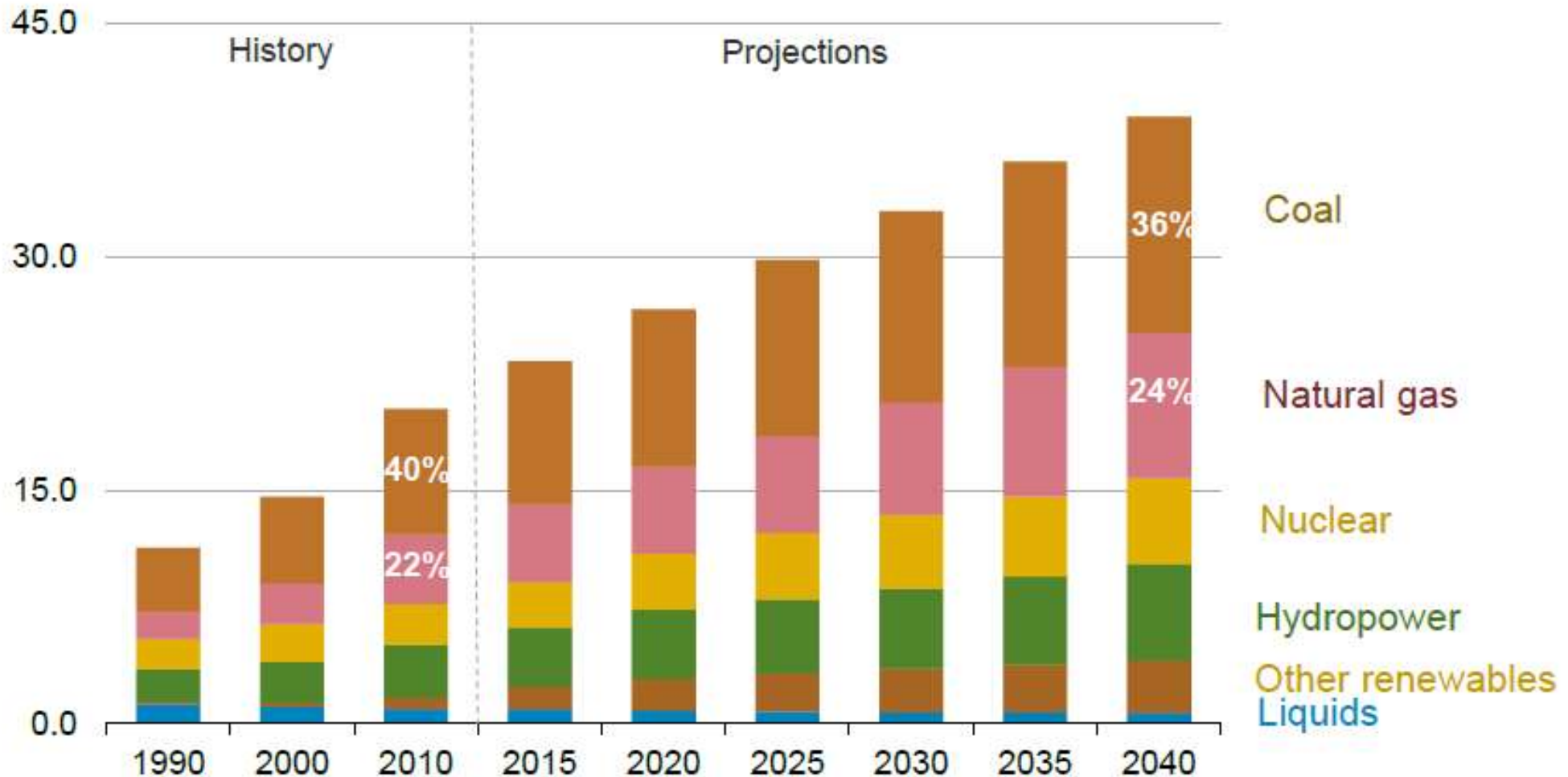
Source: EIA, International Energy Outlook 2018

<https://www.eia.gov/beta/international/>



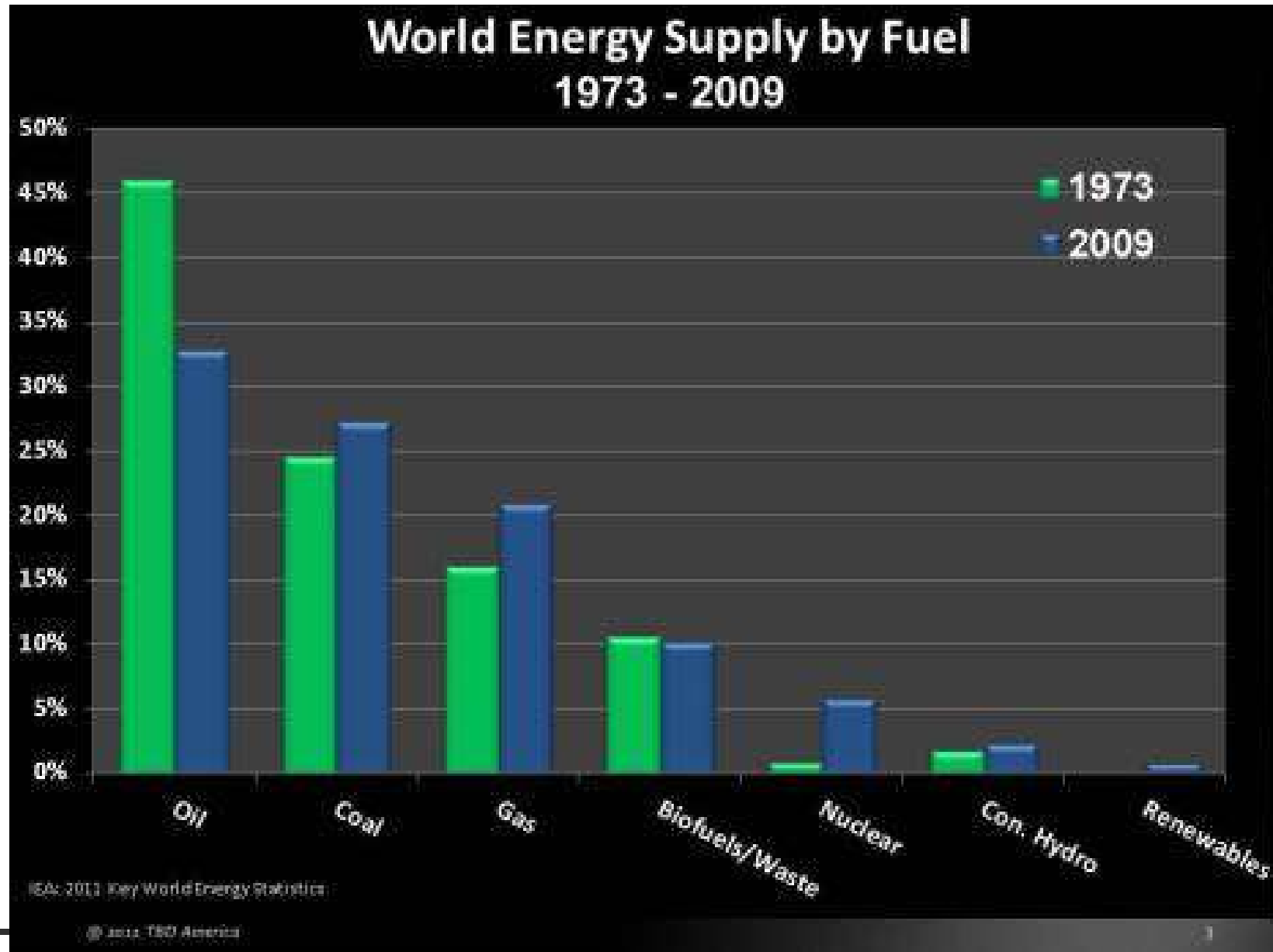
Where does electricity come from?

world electricity generation by fuel
billion kilowatthours



Source: EIA, International Energy Outlook 2013

Where does ENERGY come from (1973)





Iniziamo con un messaggio di ottimismo

*il mondo ha più risorse energetiche oggi
di quante ne abbia mai avute nel passato*

World Energy Resources
2013 Survey: Summary



Iniziamo con un messaggio di ottimismo

*il mondo ha più risorse energetiche oggi
di quante ne abbia mai avute nel passato*

World Energy Resources 2013 Survey: Summary

Dobbiamo essere grati ai combustibili fossili: sono stati, sono e continueranno per molti decenni a essere il principale motore propulsivo dello sviluppo. I progressi tecnologici nel loro utilizzo sono stati formidabili, sia in termini energetici, sia, ancora di più, in termini ambientali.

Europe's electricity providers face an existential threat

Oct 12th 2013 | [From the print edition](#)

The
Economist

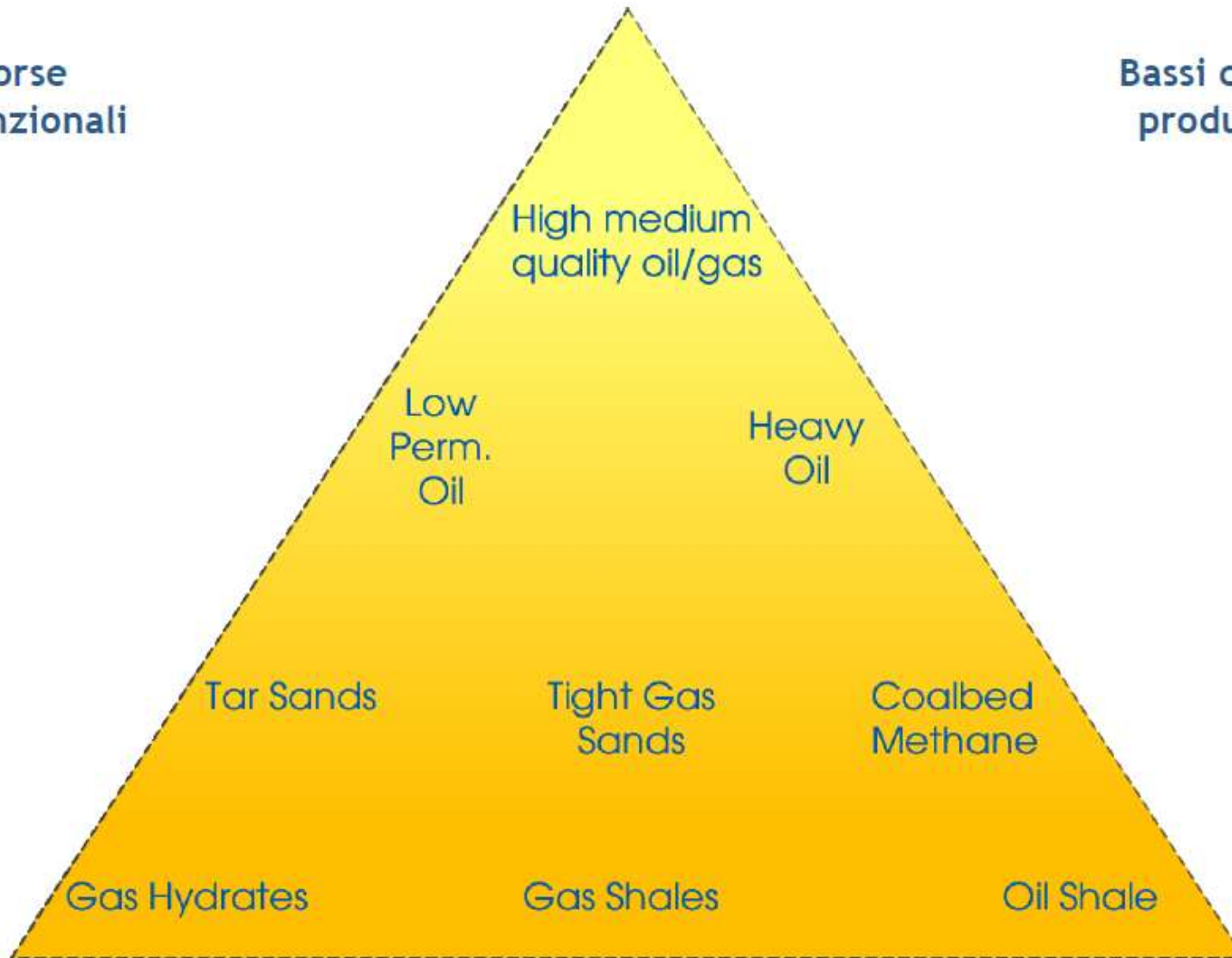


ON JUNE 16th something very peculiar happened in Germany's electricity market. The wholesale price of electricity fell to minus €100 per megawatt hour (MWh). That is, generating companies were having to pay the managers of the grid to take their electricity. It was a bright, breezy Sunday. Demand was low. Between 2pm and 3pm, solar and wind generators produced 28.9 gigawatts (GW) of power, more than half the total. The grid at that time could not cope with more than 45GW without becoming unstable. At the peak, total generation was over 51GW; so prices went negative to encourage cutbacks and protect the grid from overloading.....

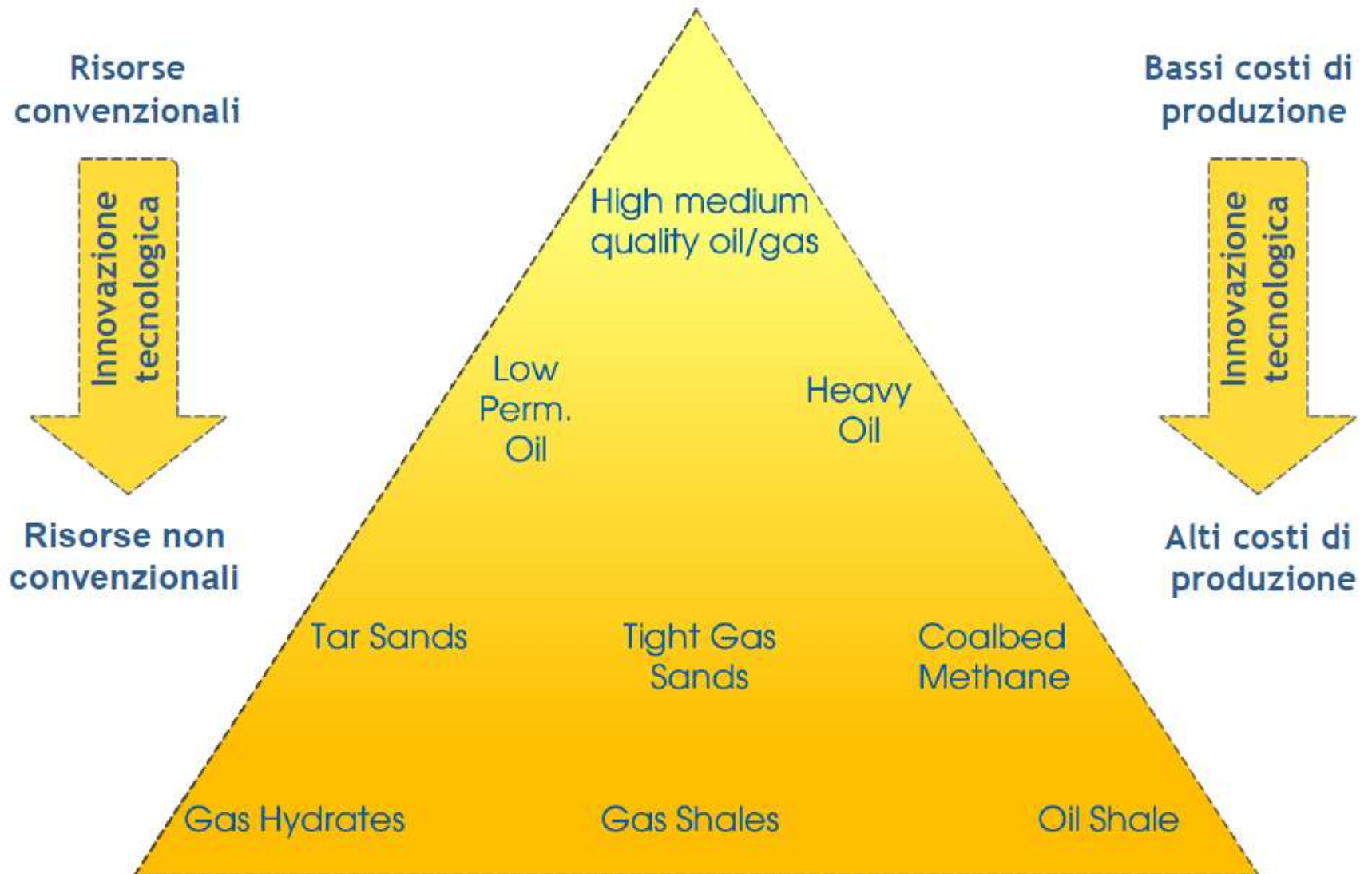
Andando verso la base del triangolo le risorse aumentano

Risorse
convenzionali

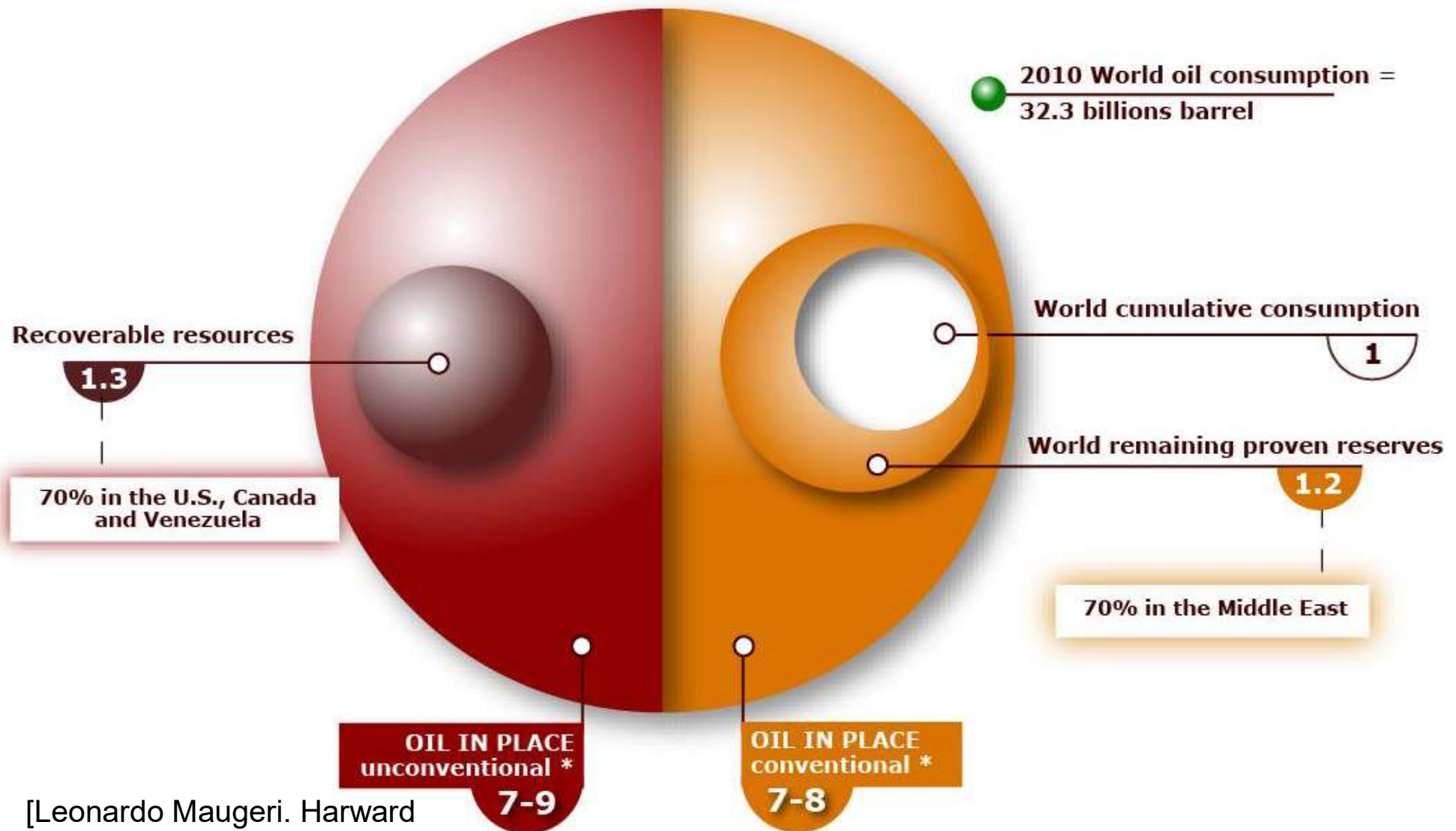
Bassi costi di
produzione



Andando verso la base del triangolo le risorse aumentano



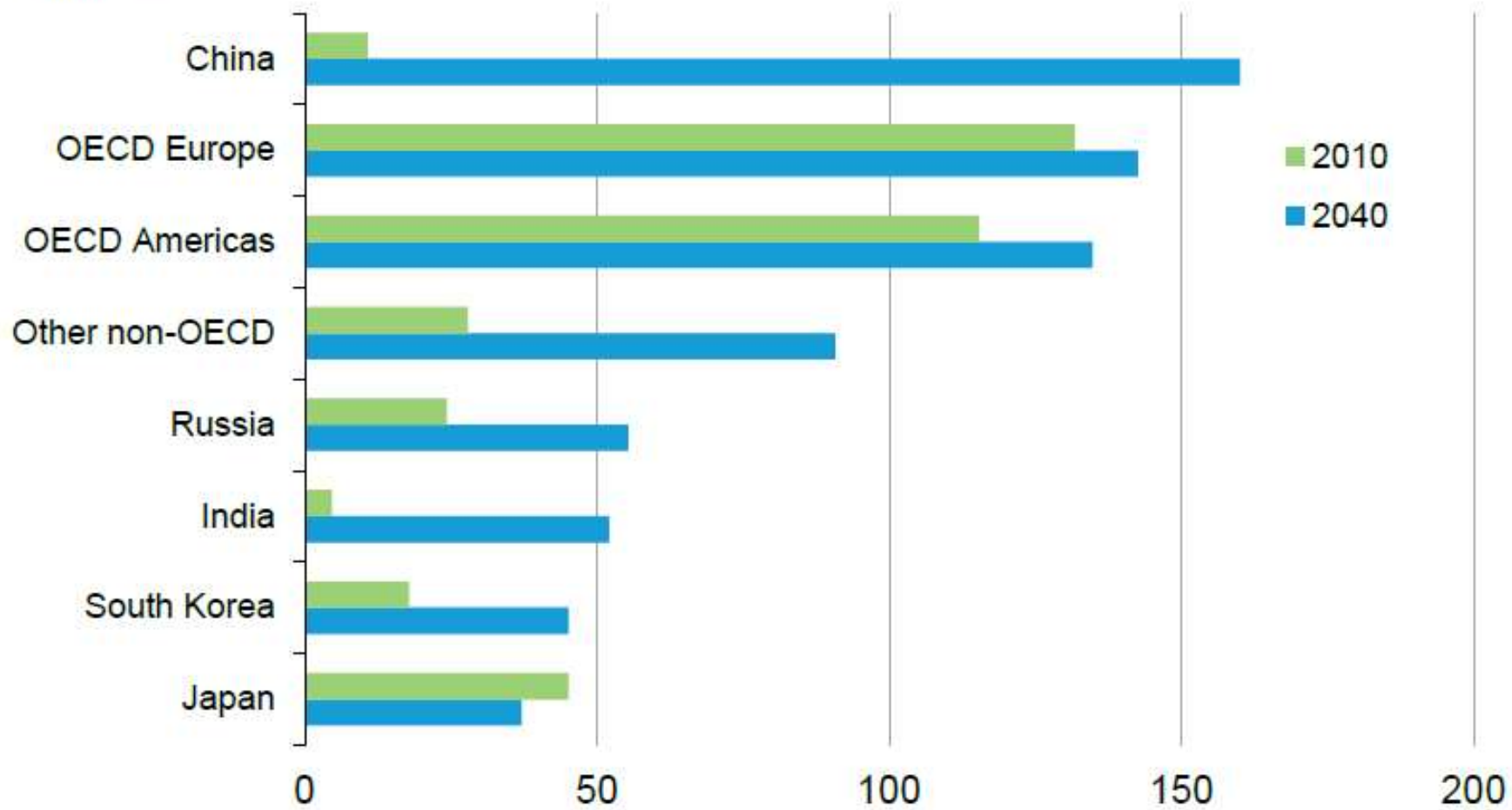
Le risorse di idrocarburi sono enormi: si inizia a non parlare più di picco del petrolio



[Leonardo Maugeri. Harvard Kennedy School]

China accounts for more than 40 percent of the global net increase in nuclear capacity

world nuclear electricity generating capacity, 2010 and 2040
gigawatts

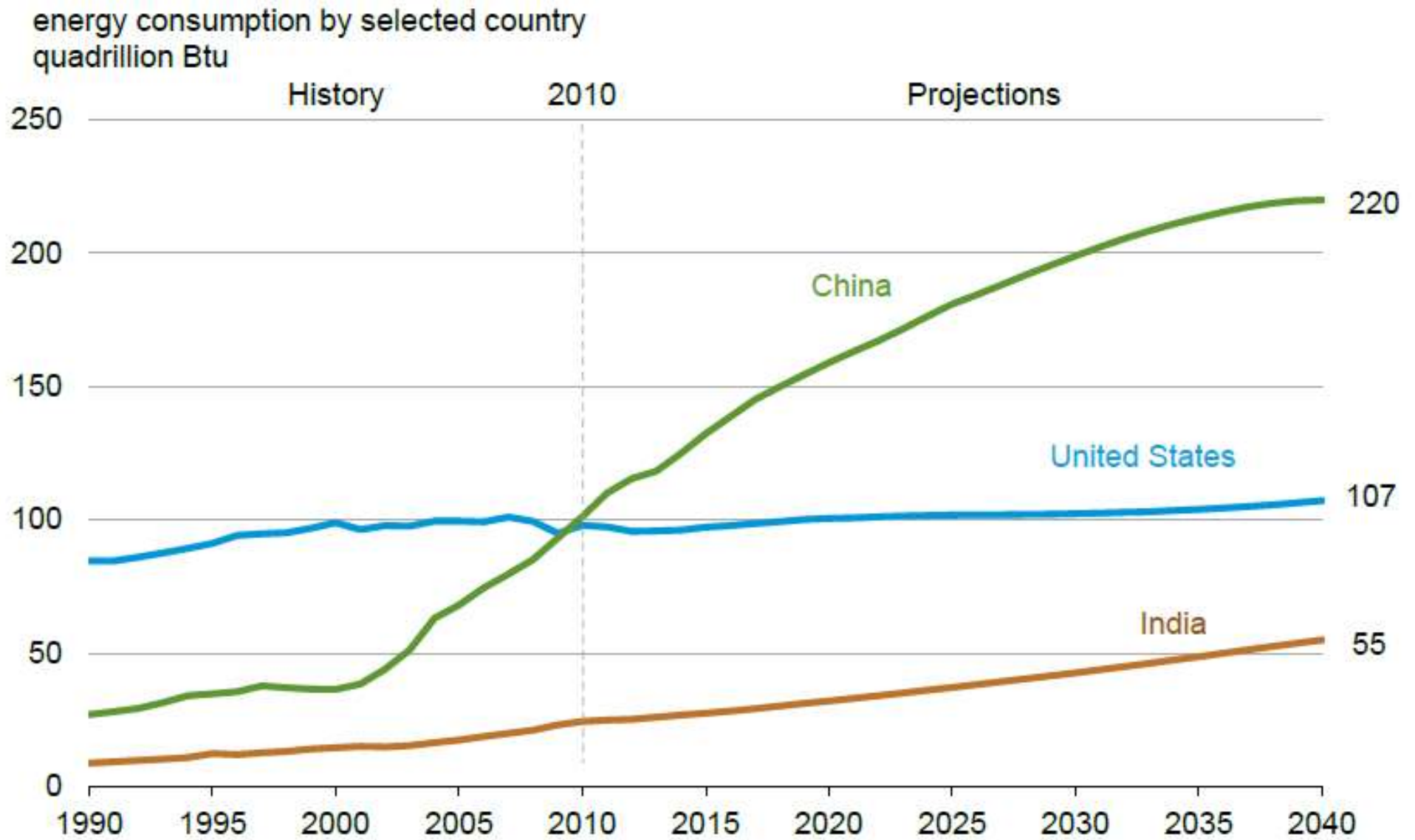


Source: EIA, International Energy Outlook 2013

L'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OCSE) (in inglese Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD); in francese Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)) è un'organizzazione internazionale di studi economici per i paesi membri, paesi sviluppati aventi in comune un sistema di governo di tipo democratico ed un'economia di mercato. L'organizzazione svolge prevalentemente un ruolo di assemblea consultiva che consente un'occasione di confronto delle esperienze politiche, per la risoluzione dei problemi comuni, l'identificazione di pratiche commerciali ed il coordinamento delle politiche locali ed internazionali dei paesi membri.



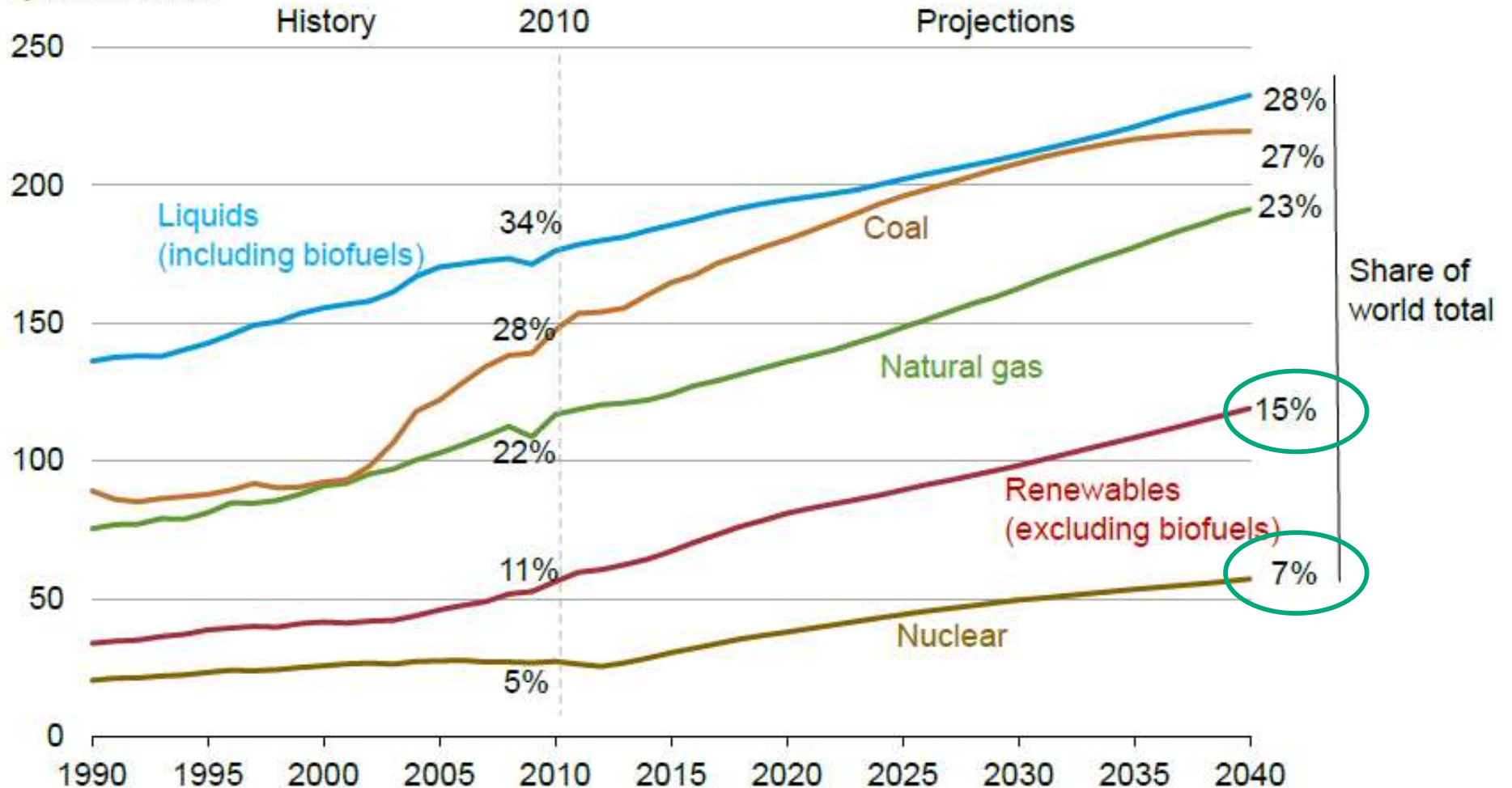
By 2040, China's energy use will be double the U.S. level; India's a little more than half despite its faster GDP growth



Source: EIA, International Energy Outlook 2013

Energy mix over time

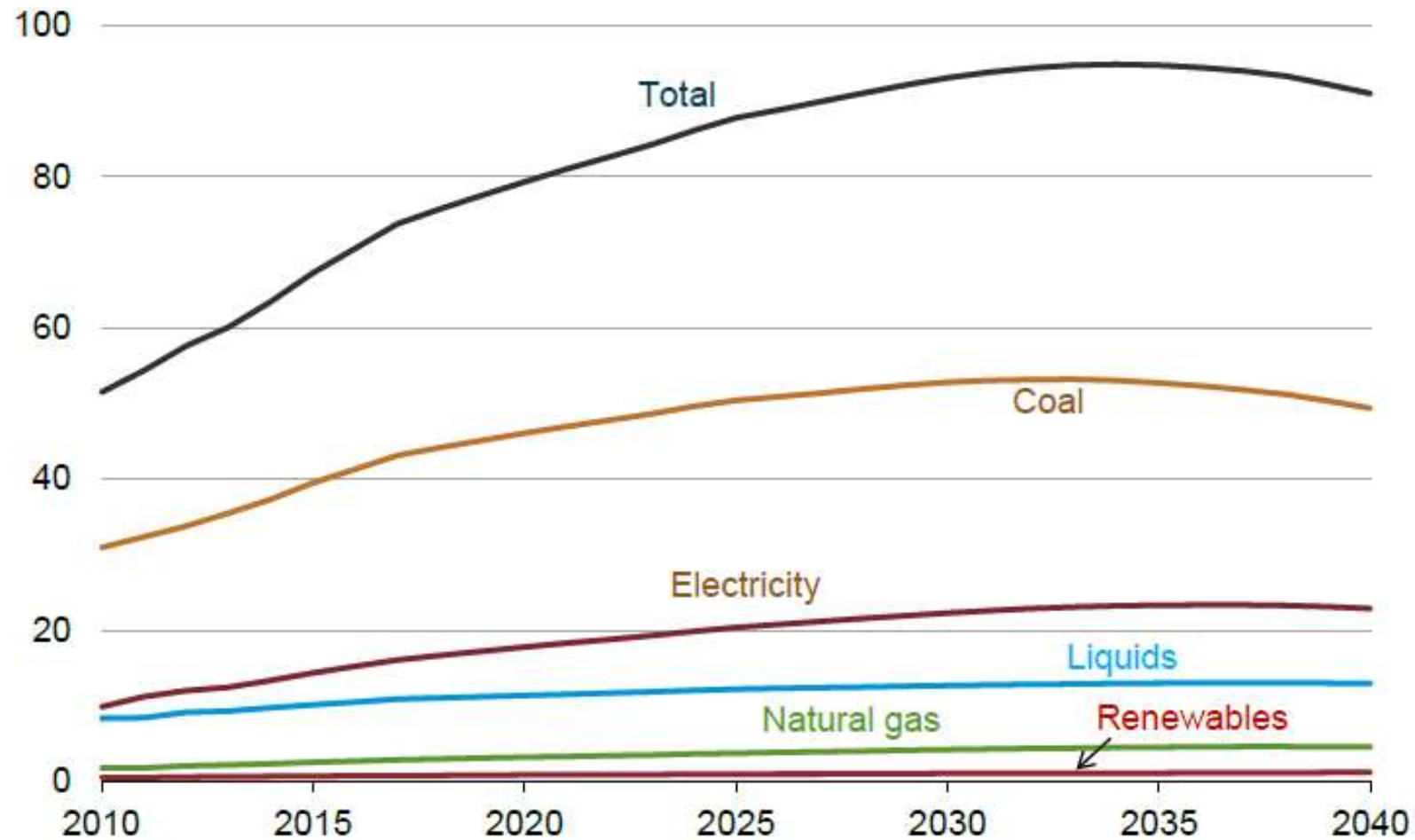
world energy consumption by fuel
quadrillion Btu



Source: EIA, International Energy Outlook 2013

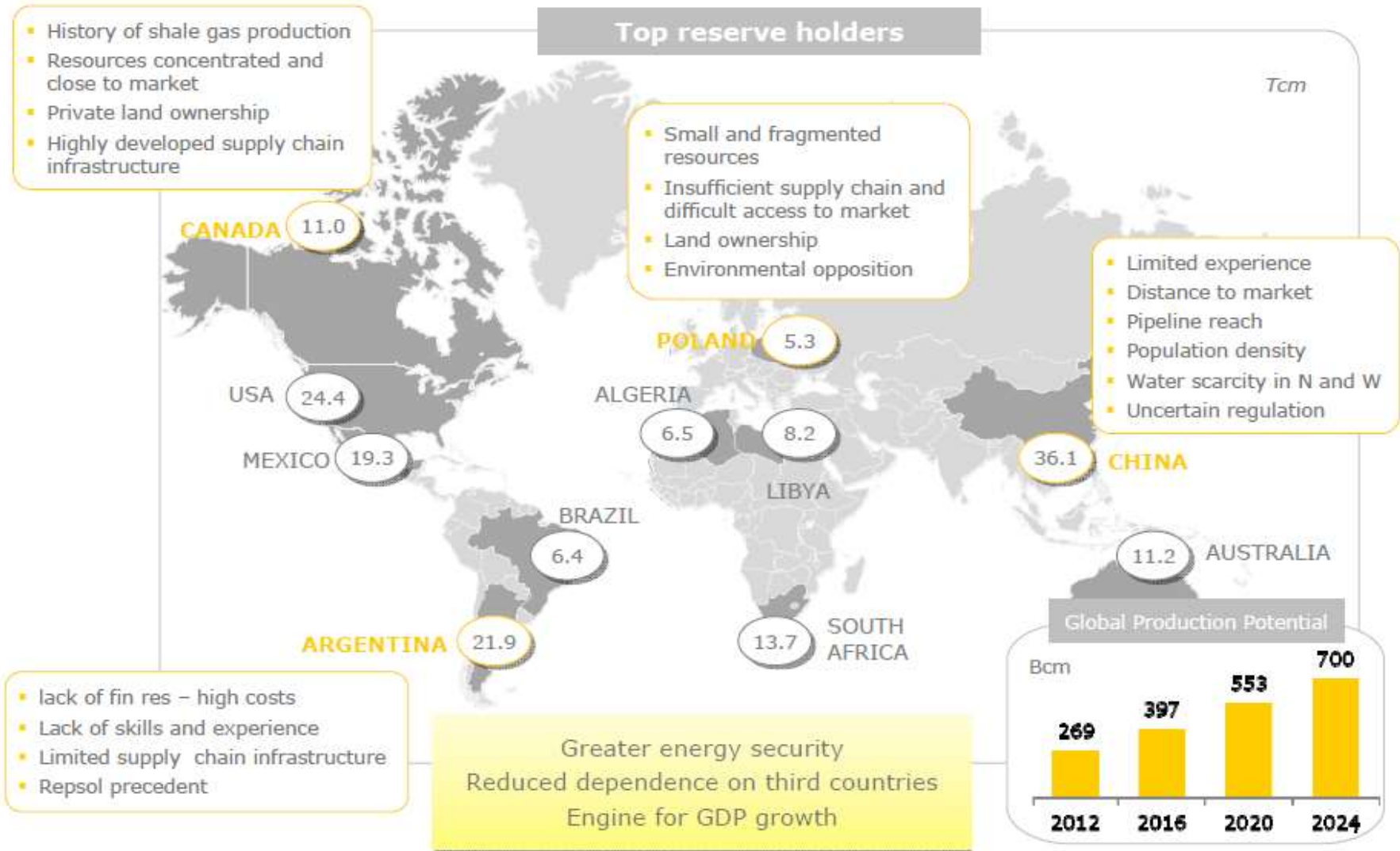
Industrial sector energy consumption in China

China industrial sector energy consumption by fuel
quadrillion Btu



Source: EIA, International Energy Outlook 2013

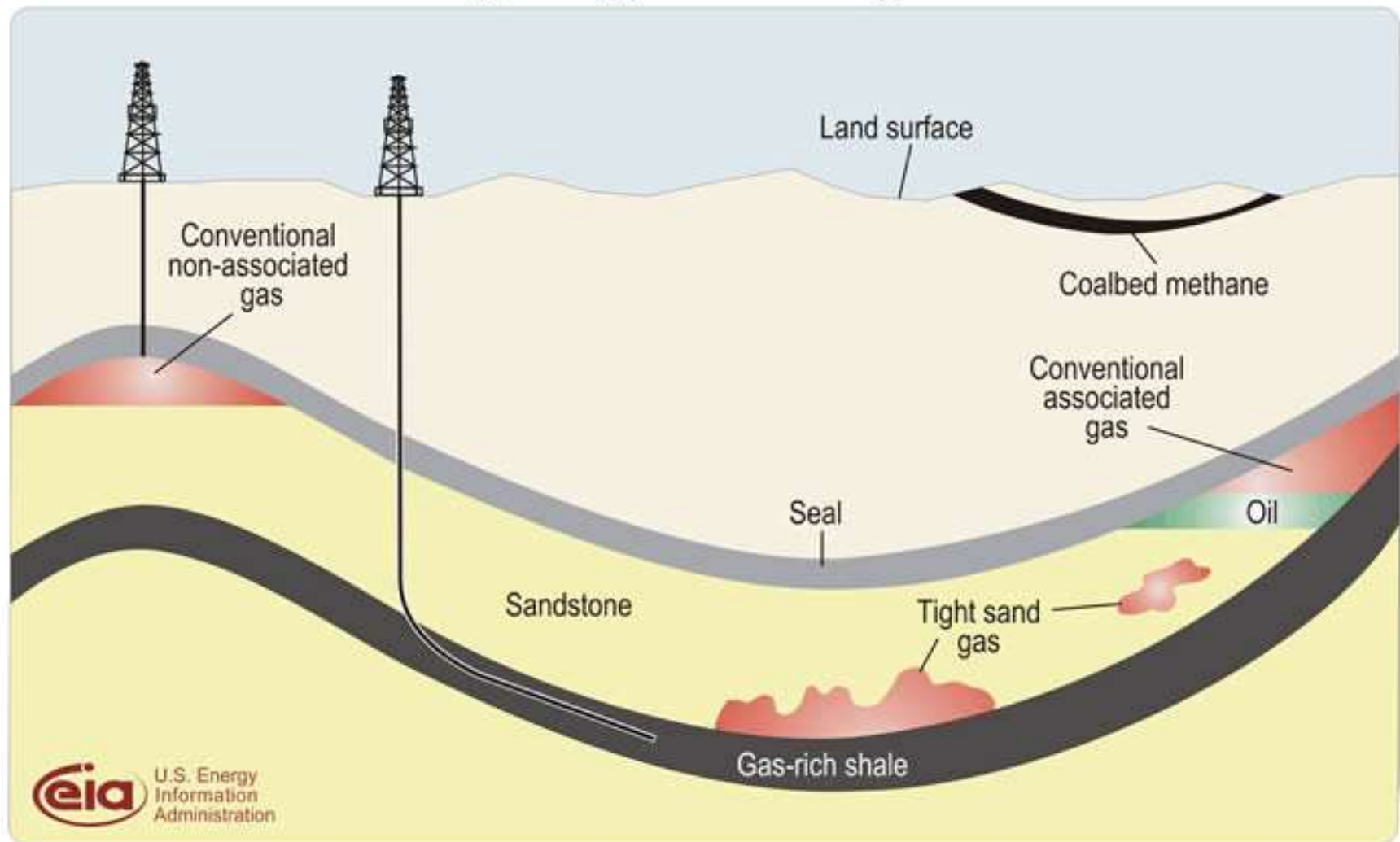
Scenario planning and Shale gas revolution



Source: Reuters, Woodmackenzie

Shale gas

Schematic geology of natural gas resources



The evolution of shale gas

1825

- First extraction in Fredonia, NY, in shallow low-pressure fractures

1920's

- First field-scale development of shale gas (Ohio Shale, Kentucky, Antrim Shale, Michigan)

1950's

- Hydraulic Fracturing becomes commercially viable (> 1 million wells)

1970's

- First patent for directional drilling
- First demonstration of massive hydraulic fracturing

1980's

- Horizontal drilling becomes commercially viable
- First large-scale hydraulic fracturing on shale well (Barnett, TX)

1992

- First horizontal shale gas well with hydraulic fracturing (Barnett TX)

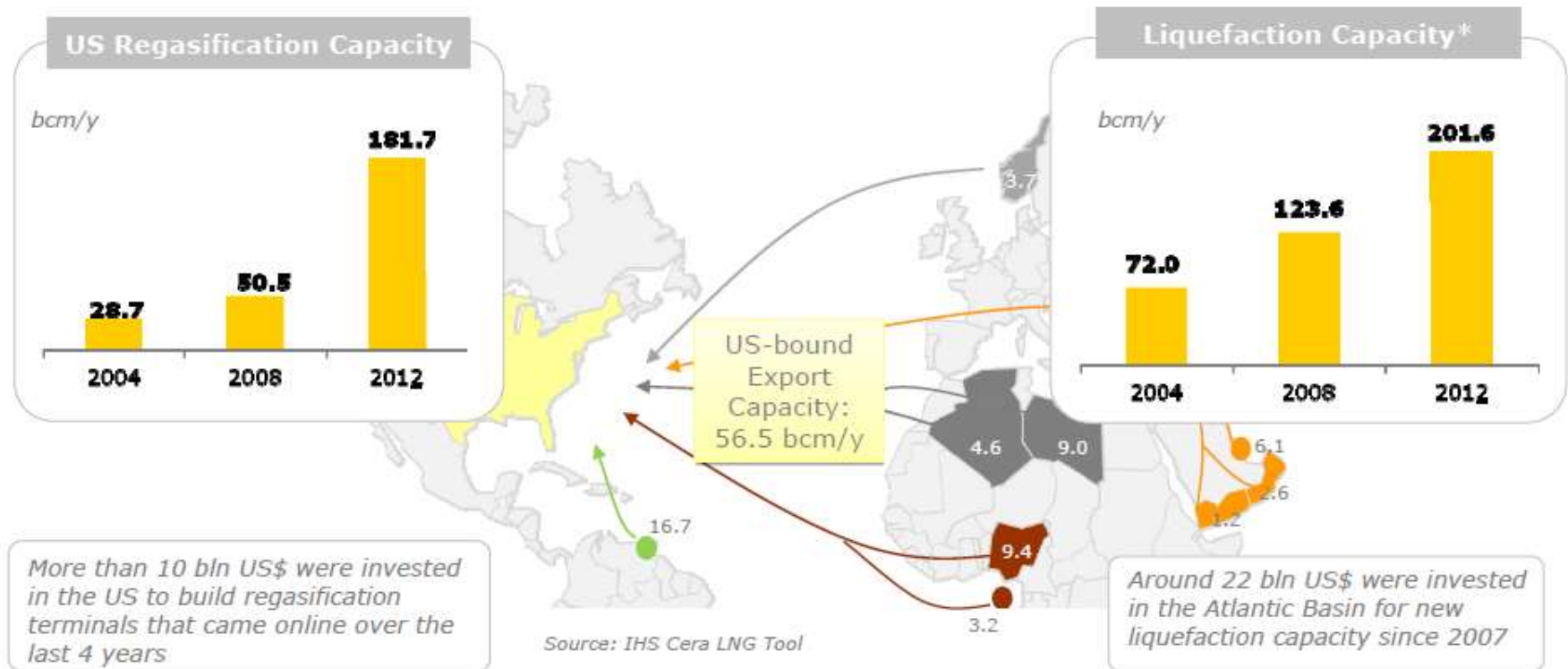
2005

- Shale gas production takes off

In 2012 US shale gas production alone ranks third globally, after US and Russia

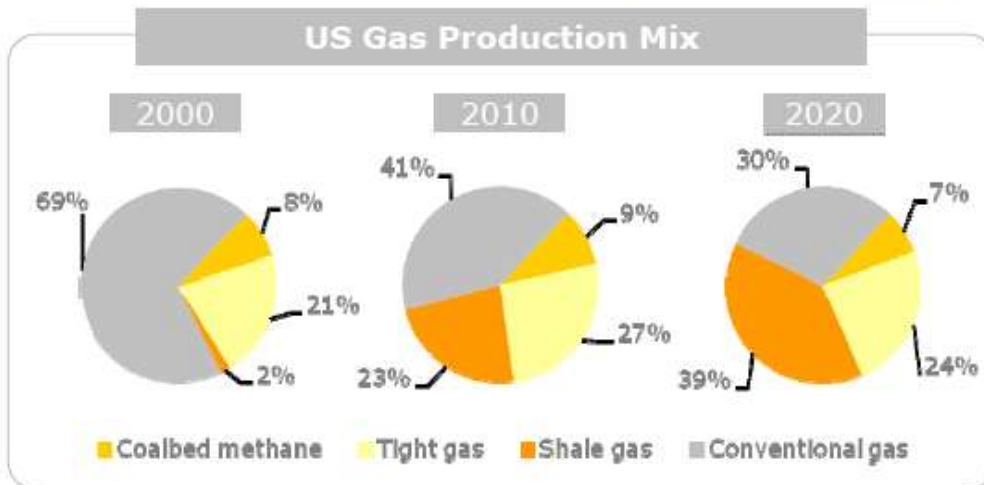
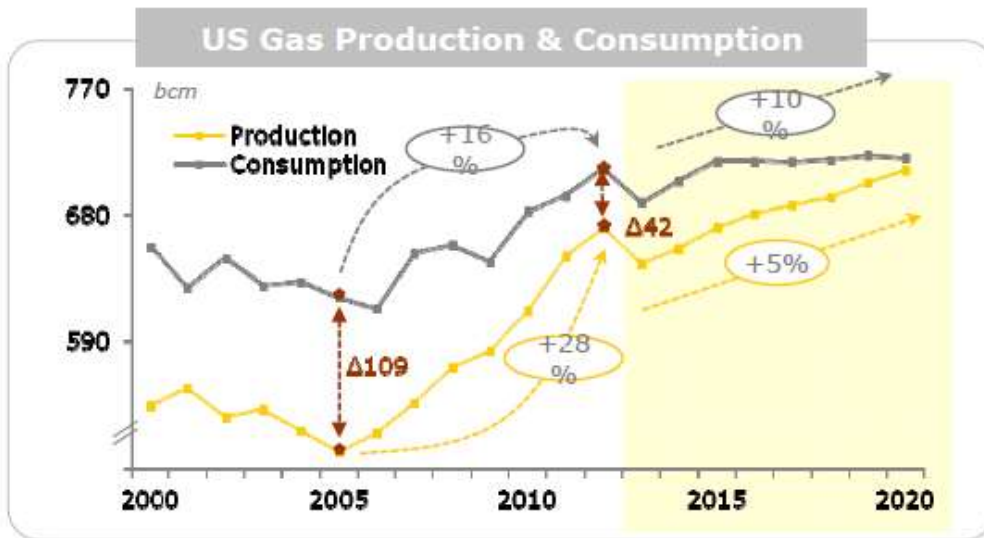
The shale gas phenomenon was unforeseen

- The US expected a sharp decline in domestic gas production and LNG imports were the only solution to cope with gas demand
- Many IOCs invested in the LNG chain as a result of increasing US gas demand forecasts



Today the US could have been the second largest LNG importing country after Japan

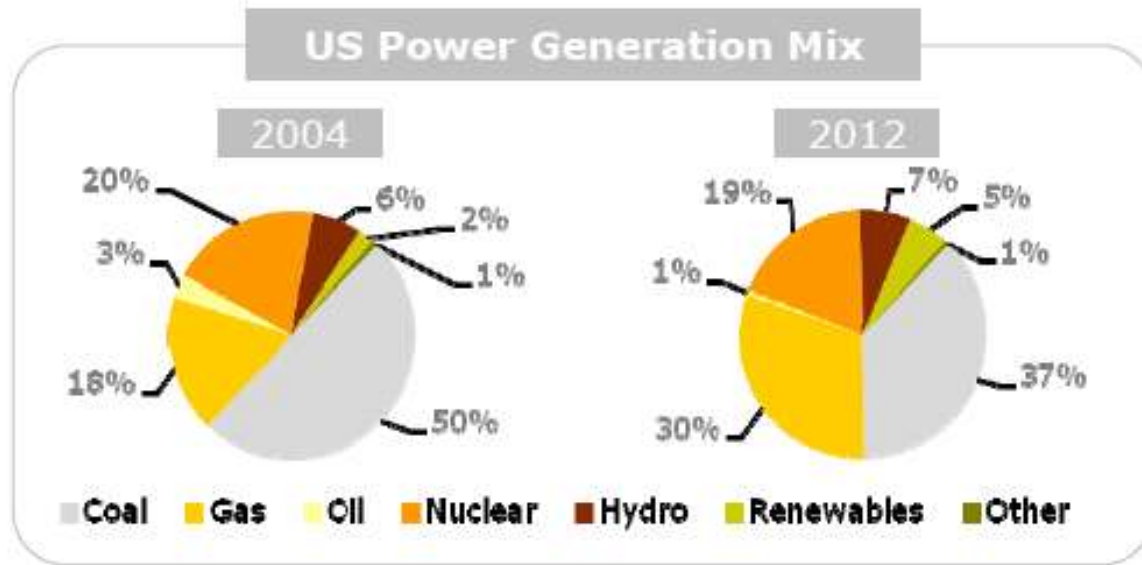
Shale gas is reshaping US gas market



Source: eia

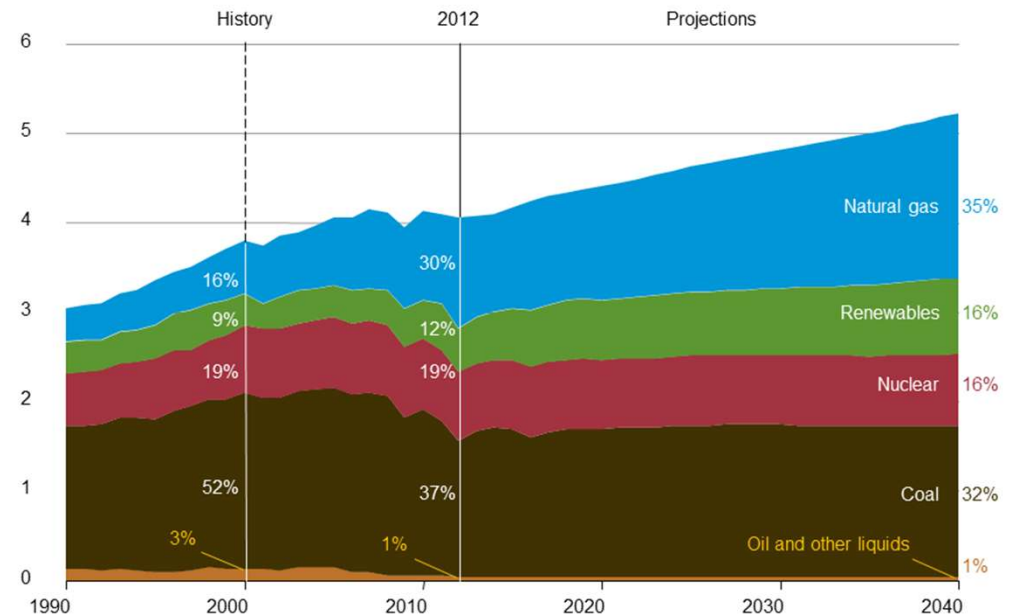
- Shale gas encouraged recovery and then growth of gas consumption after the financial downturn
- Consumption-to-production gap will slim down to less than 10 bcm in 2020
- Production will have to satisfy domestic consumption, to allow for LNG exports
- Shale production was less than 2% of total gas production in 2000 and reached nearly 35% in 2012
- In 2020, shale gas is expected to reach around 40% of total gas production although its growth will decrease to 5% yoy

US and world power generation mix

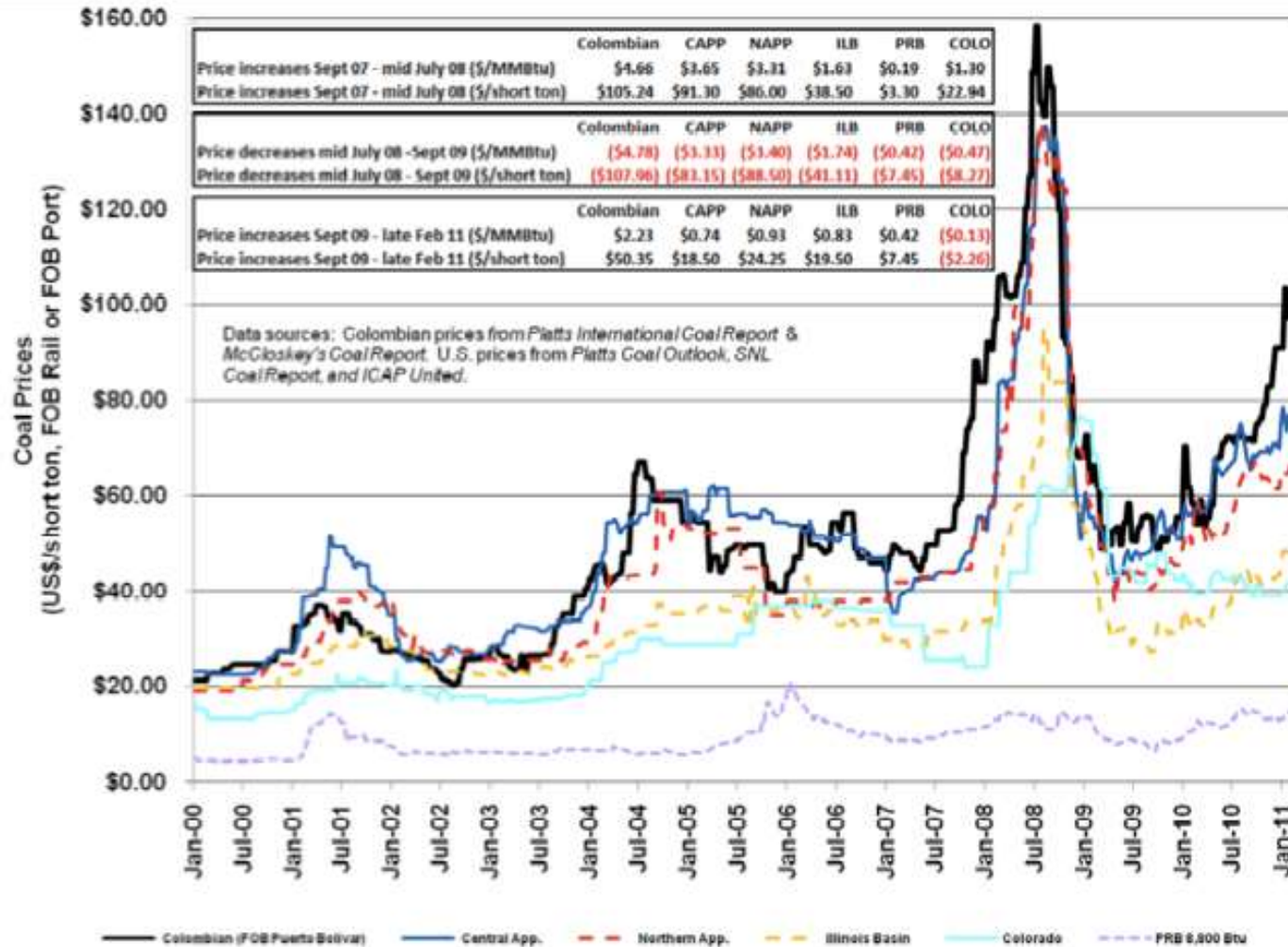


Generation by fuel, 1990-2040

[EIA]



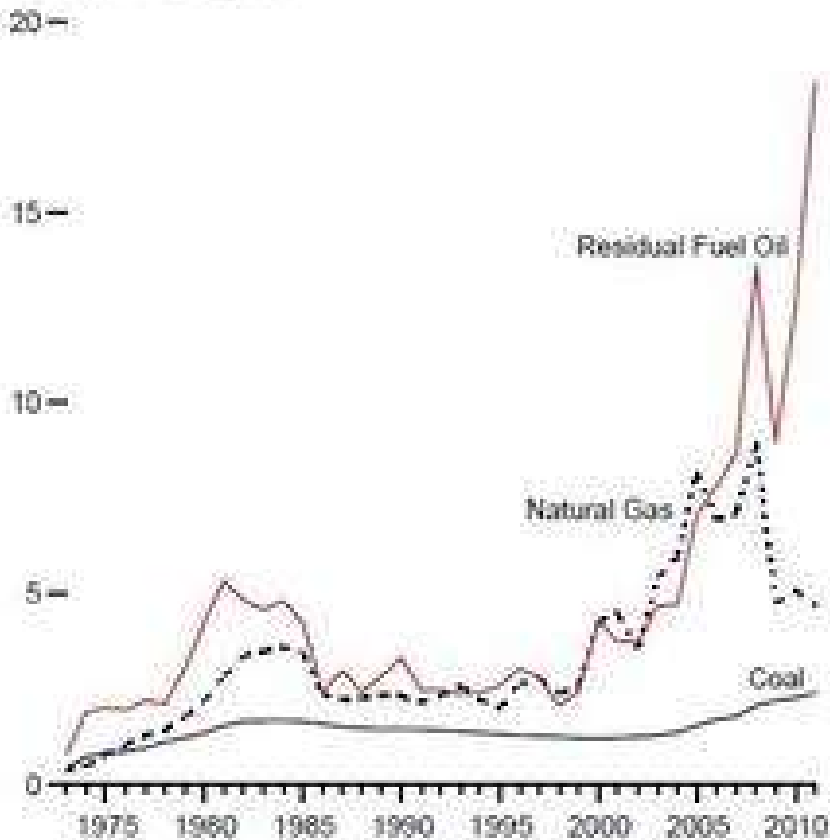
Andamento costi combustibile



Andamento costi combustibile

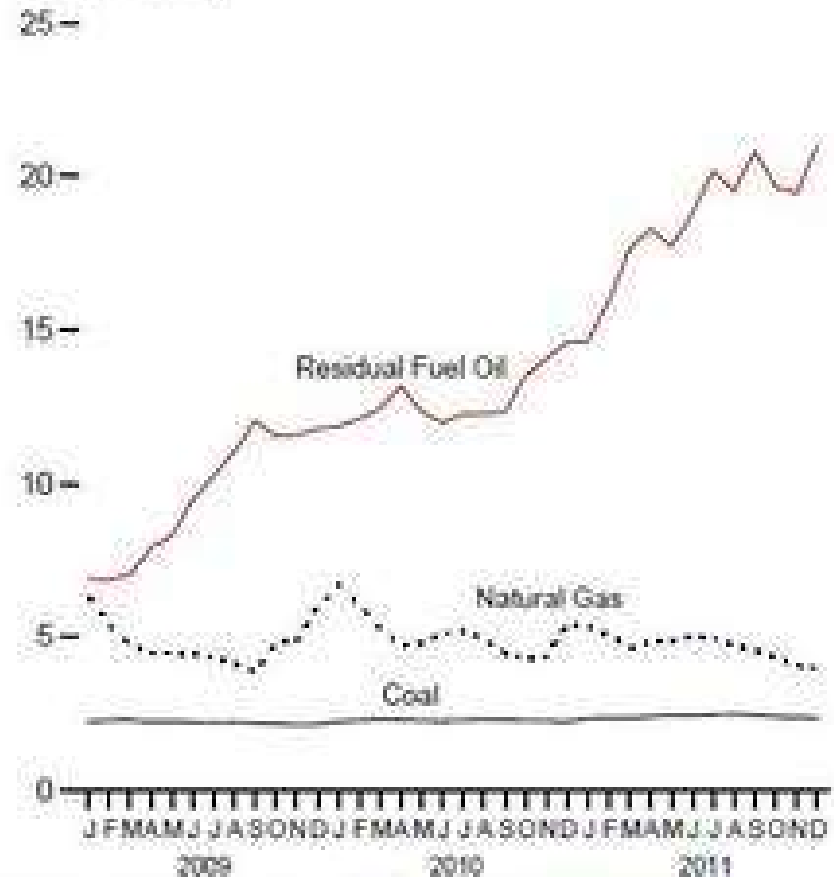
Figure 9.3 Cost of Fossil-Fuel Receipts at Electric Generating Plants
(Dollars* per Million Btu, Including Taxes)

Costs, 1973-2011



*Prices are not adjusted for inflation. See "Nominal Dollars" in Glossary.

Costs, Monthly



Web Page: <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/#prices>
Source: Table 9.10.



Link

- Per esempio
 - <https://tradingeconomics.com/commodity/coal>

Coal

2022 Data - 2

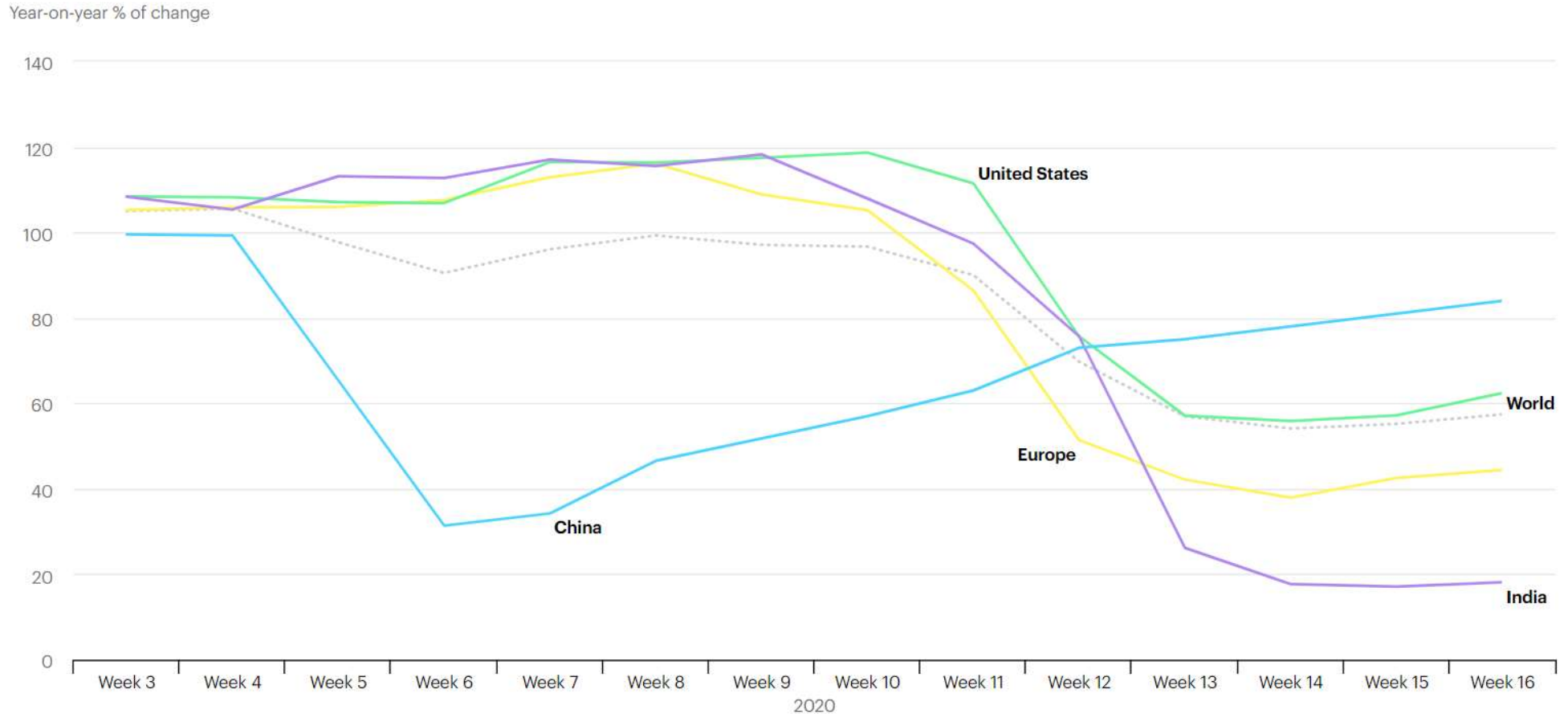
Summary Forecast Stats Download ▾ Alerts

Coal (USD/T) 418.75 +179.75 (+75.21%)



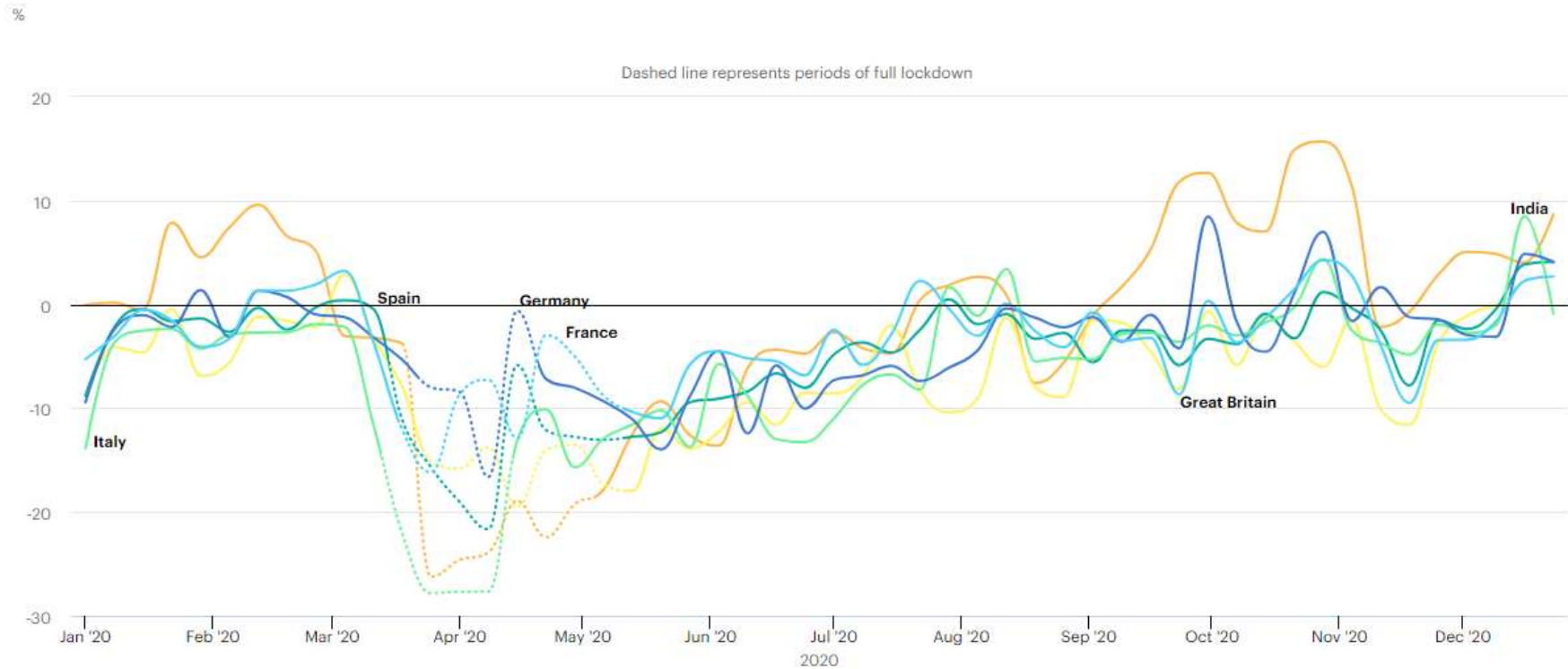
1Y 5Y 10Y All

Evolution of road passenger transport activity in selected countries in early 2020- covid



2020 IEA

Evolution of road passenger transport activity in selected countries in early 2020- covid



IEA. All Rights Reserved

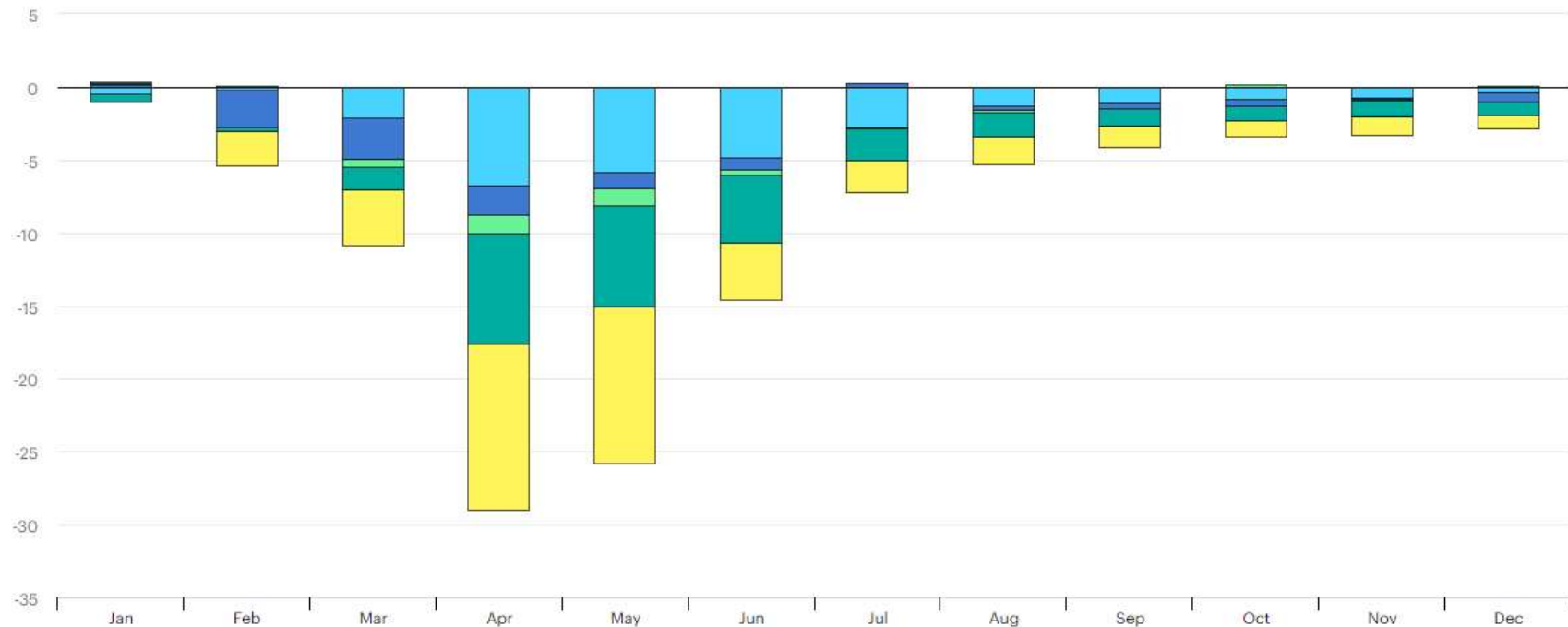
● France ● Germany ● Italy ● Spain ● Great Britain ● India

Change in monthly oil demand in selected countries, 2020 relative to 2019

Change in monthly oil demand in selected countries, 2020 relative to 2019

Open ↗

mb/d



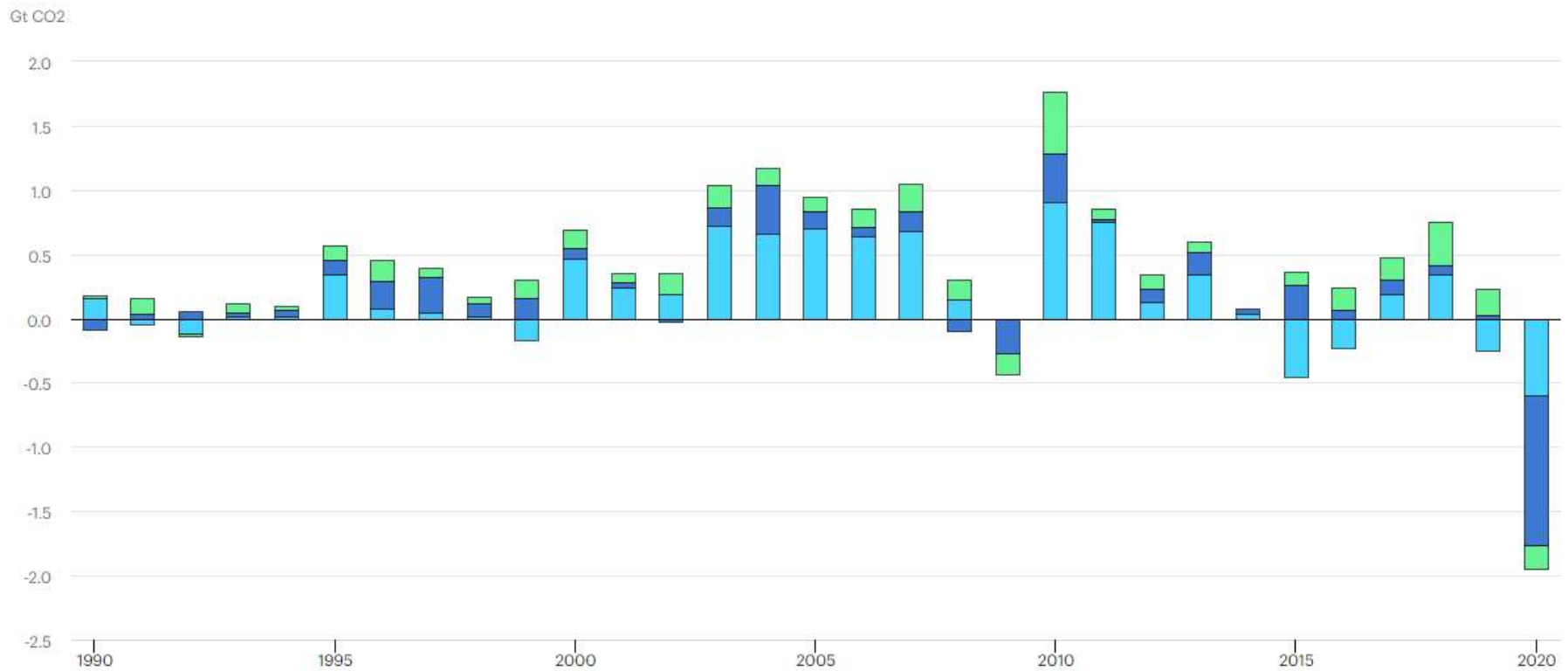
IEA. All Rights Reserved

● Europe ● China ● India ● United States ● Rest of world

Change in CO2 emissions by fuel, 1990-2020

Download chart ↓

Cite Share

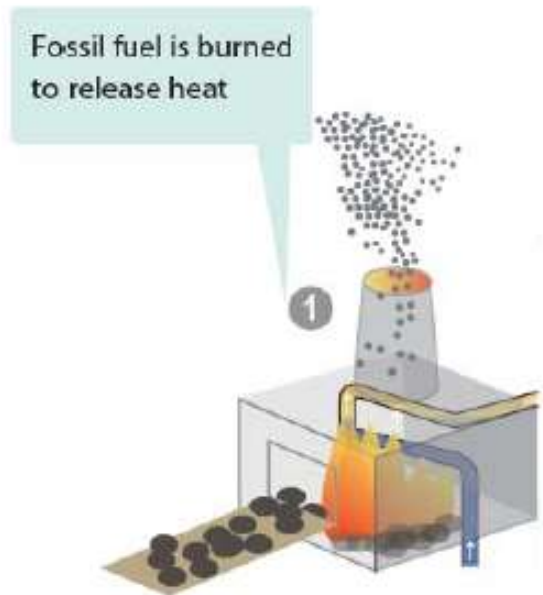


IEA. All Rights Reserved

● Coal ● Oil ● Gas

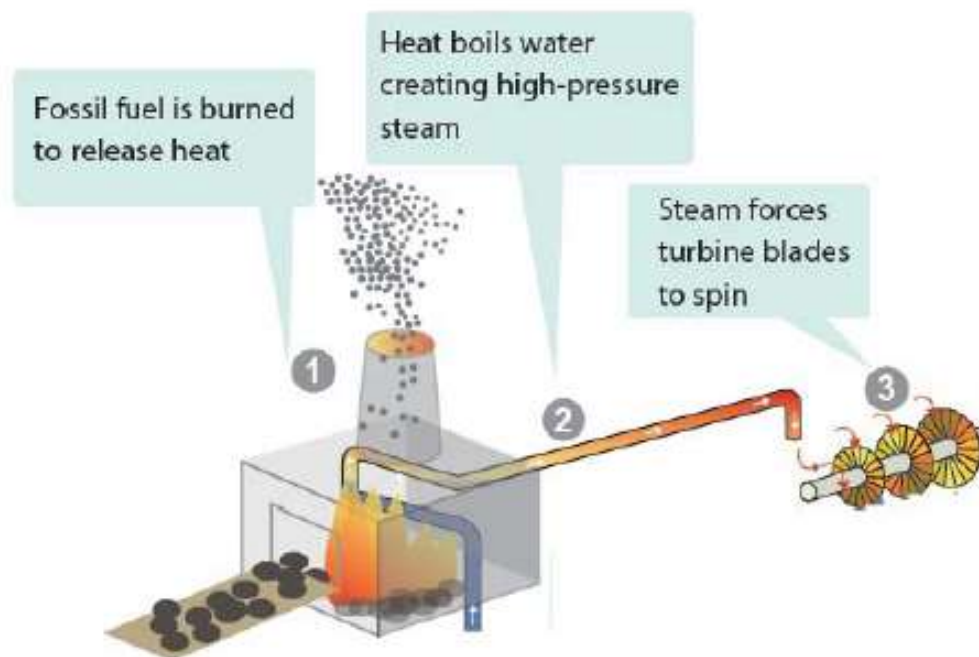
Electricity production

Heat



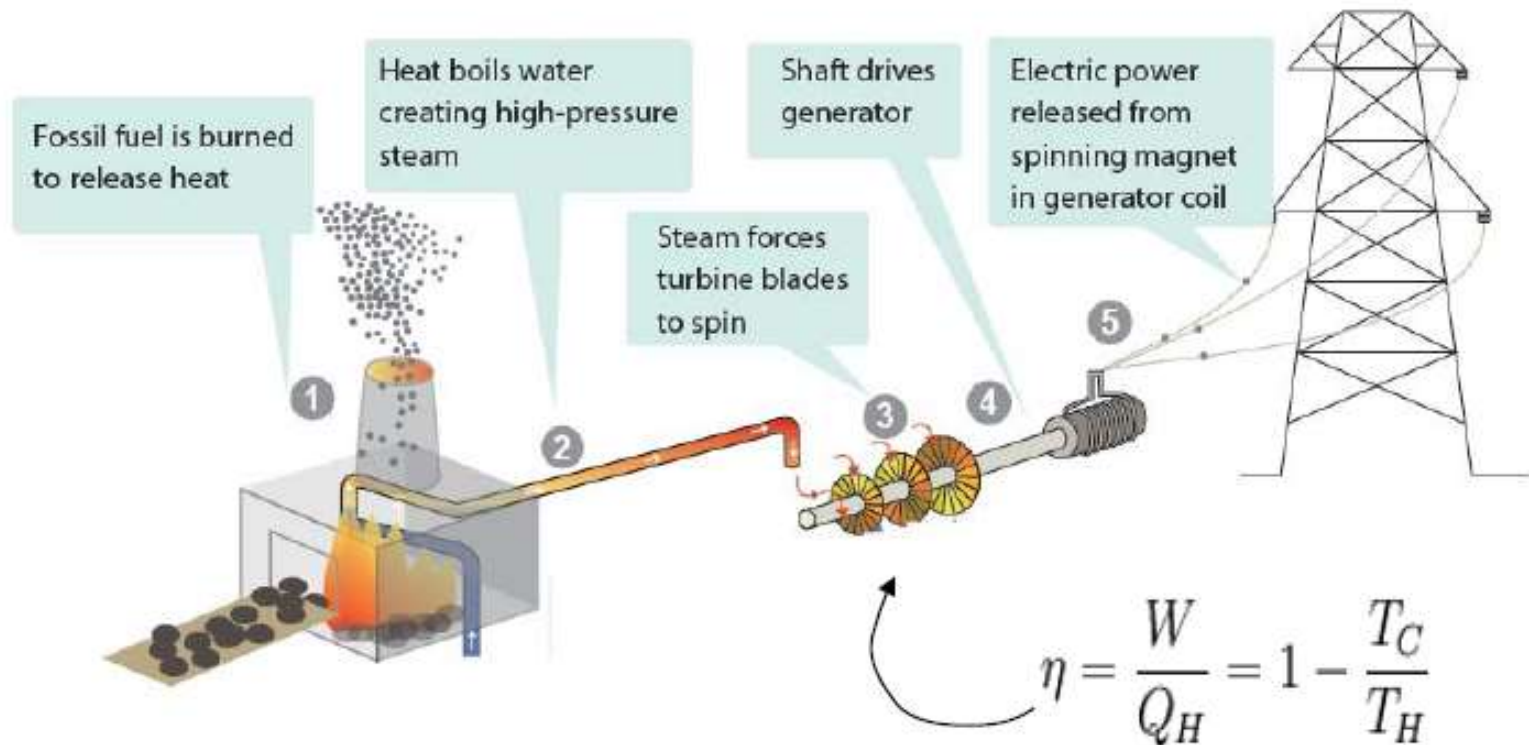
Electricity production

... from heat to steam

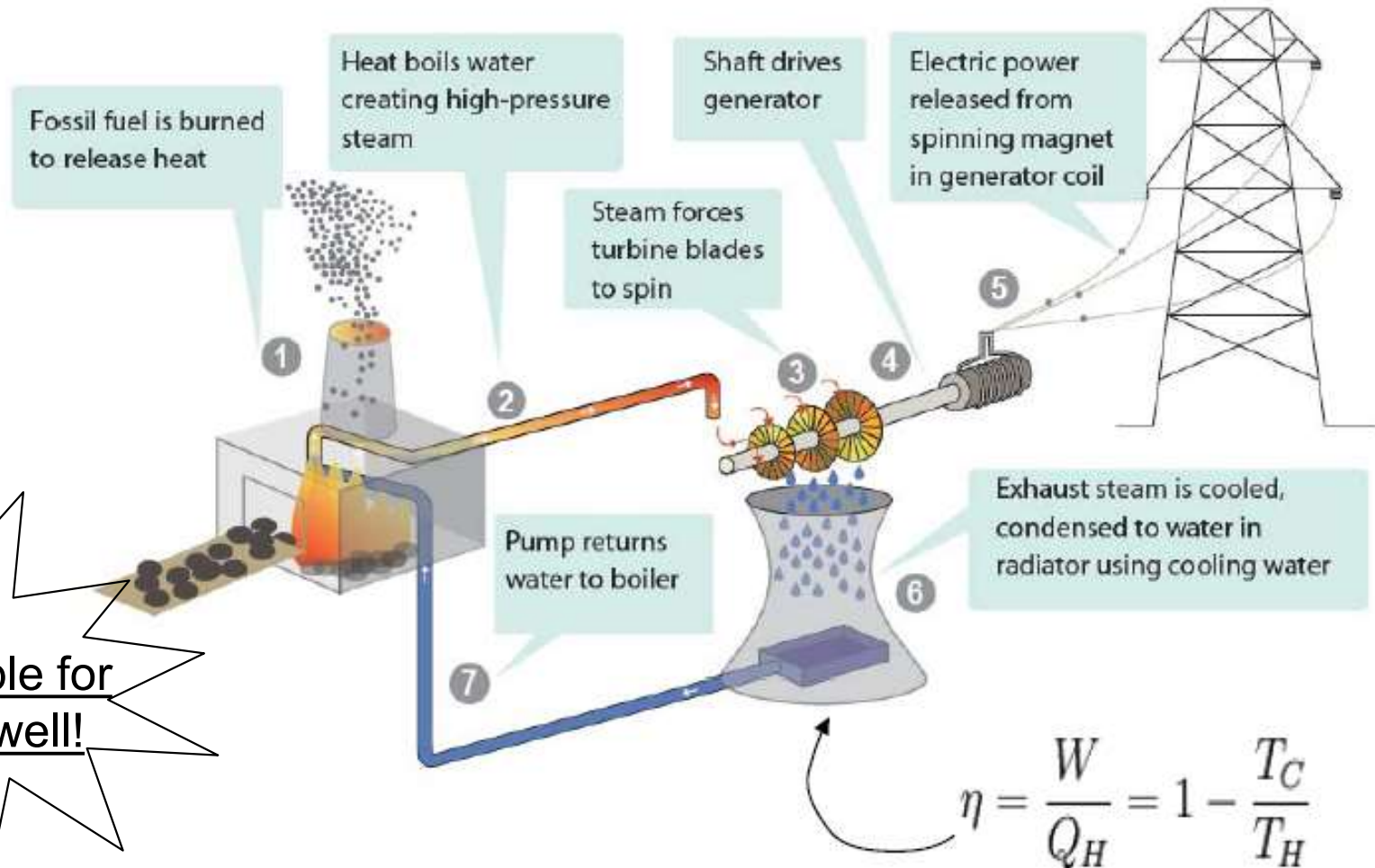


Electricity production

... from steam to electricity



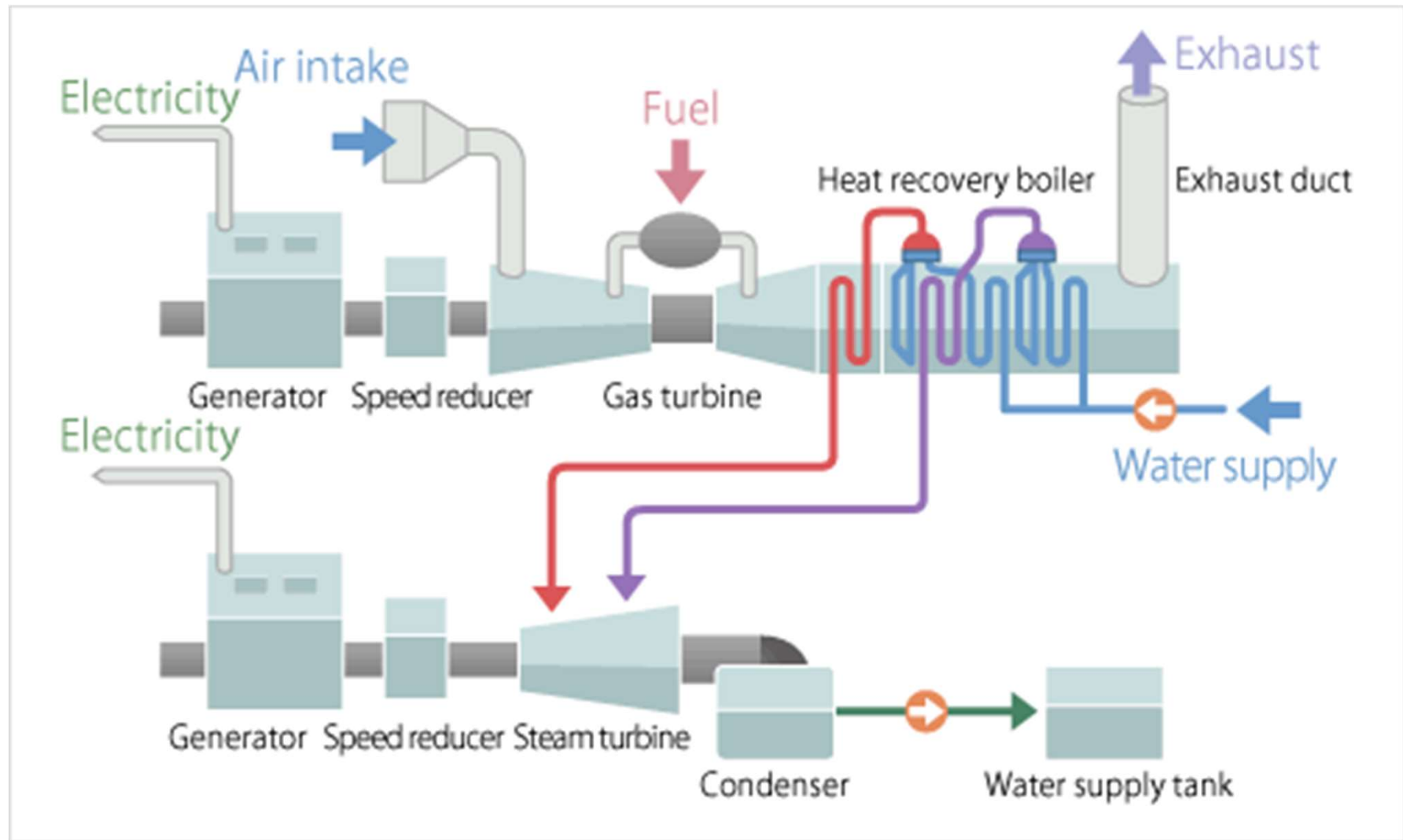
Electricity production



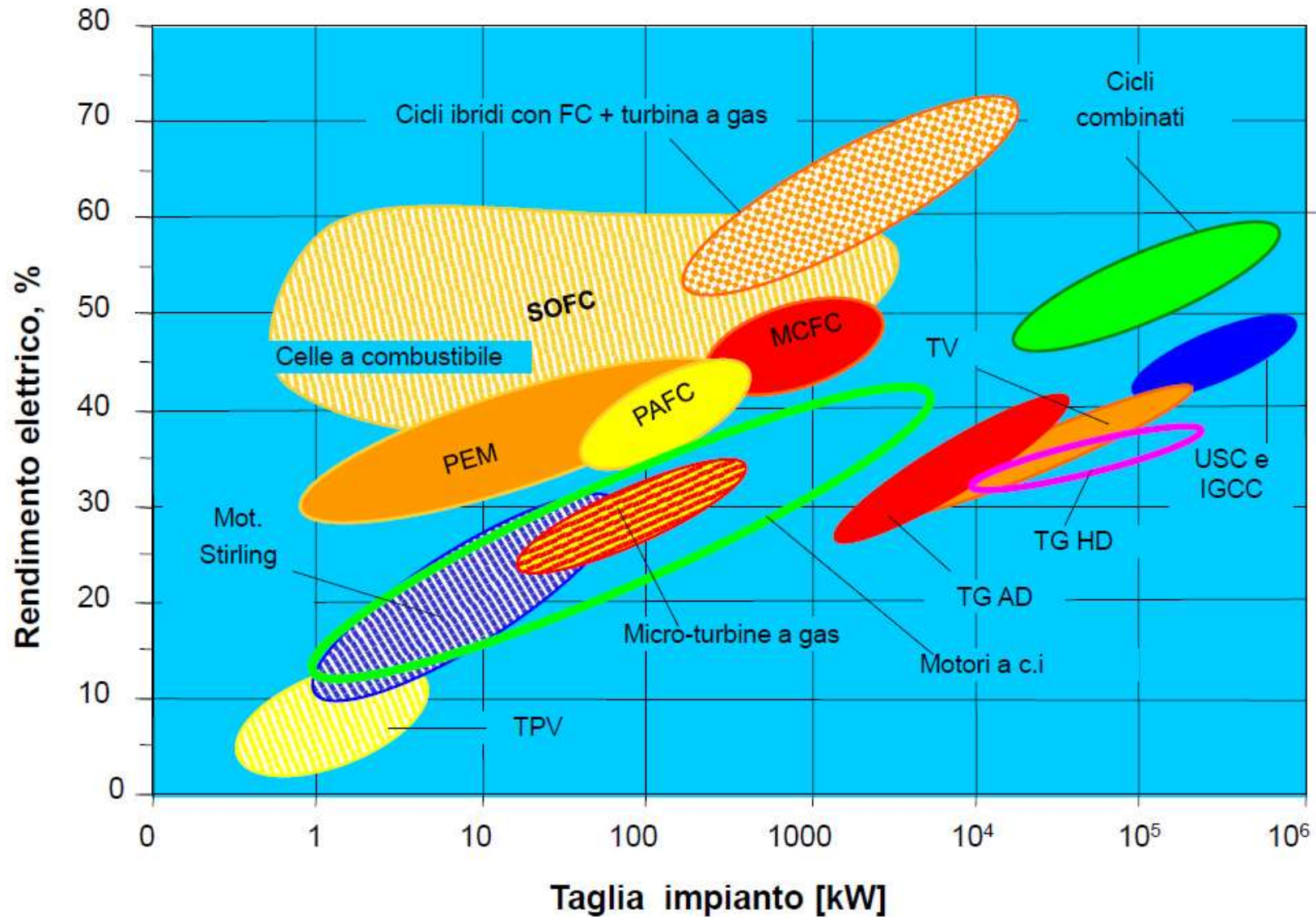
Same principle for nuclear as well!

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Combined cycle

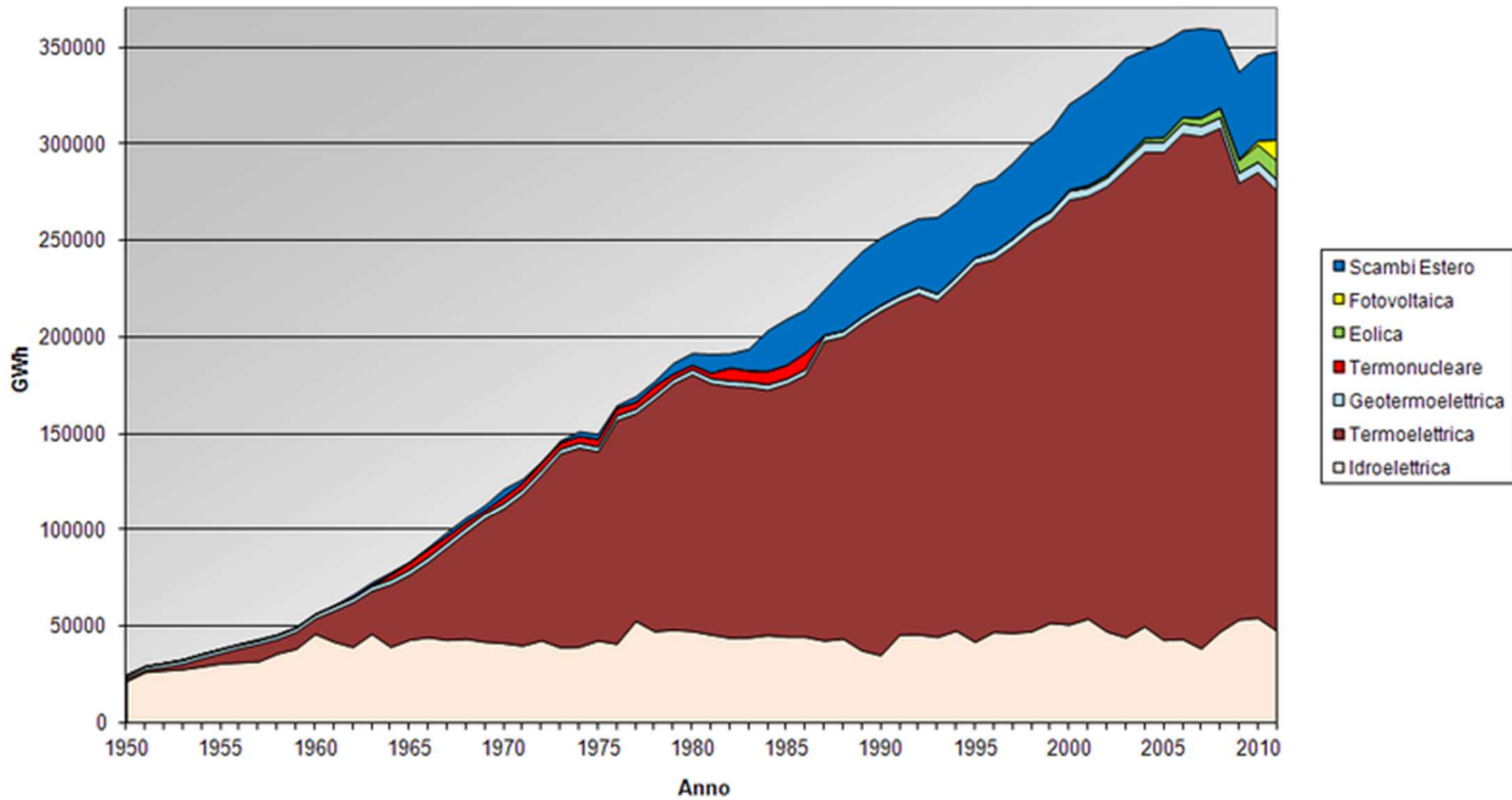


Impianti di generazione



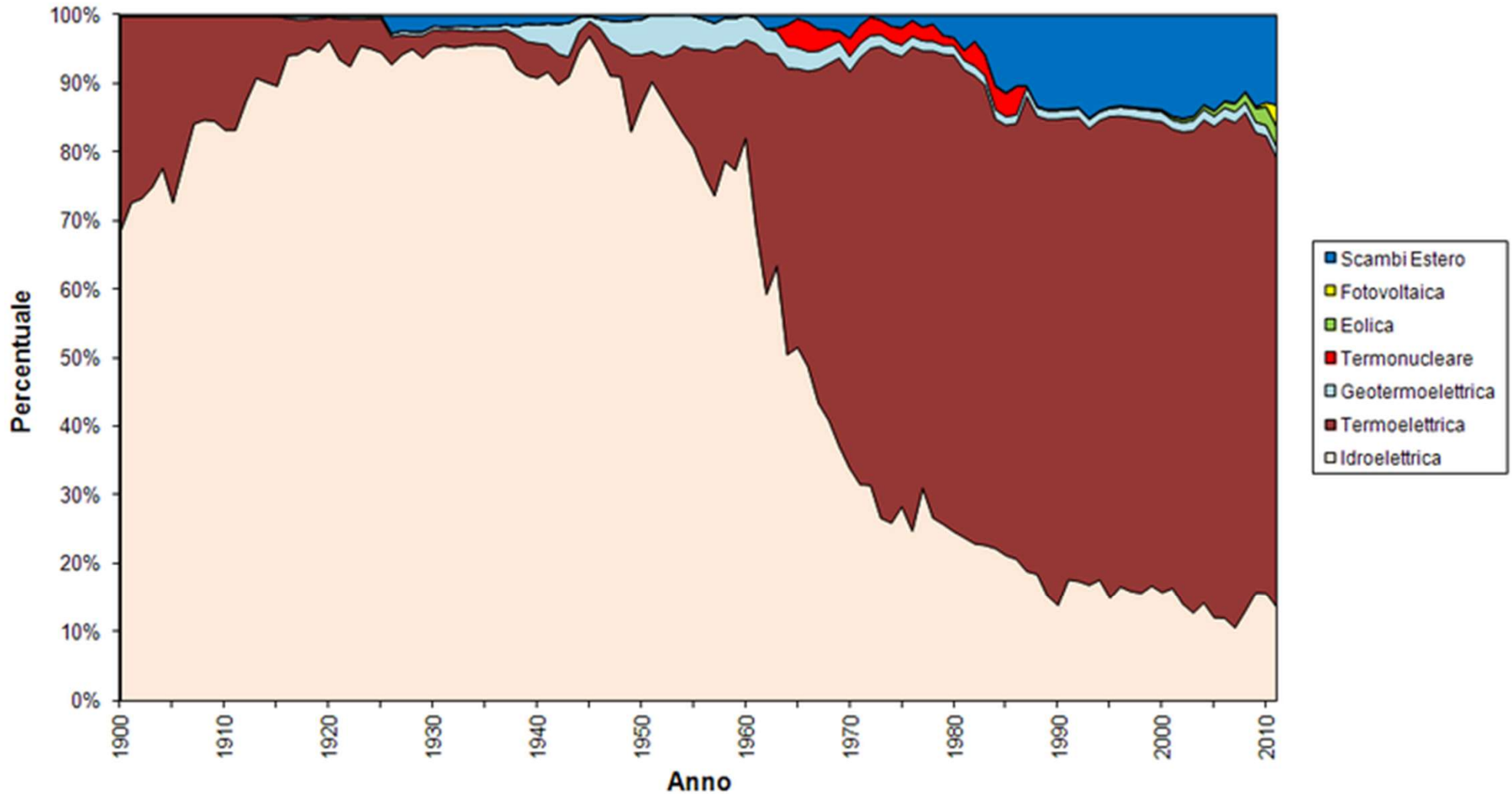
Italia

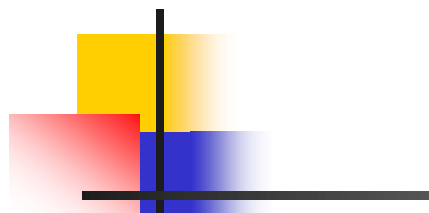
Riepilogo Storico della Produzione di Energia in Italia



Italia

Riepilogo Storico Variazione Percentuale Fonti - Italia





Potenza nominale ed efficiente degli impianti termoelettrici in Italia al 31 dicembre 2010

Produttori				
Sezioni	Potenza nominale		Potenza efficiente	
	Motori primi	Generatori	Lorda	Netta
n.	MW	MVA	MW	MW

A) Impianti con sola produzione di energia elettrica

combustione interna (CI)	774	784,4	974,1	767,5	739,7
-fino a 25	774	784,4	974,1	767,5	739,7
turbine a gas (TG)	46	2.488,9	3.028,1	2.479,8	2.458,3
-fino a 25	17	142,7	162,6	134,6	133,2
-oltre 25 fino a 50	6	186,0	246,1	185,0	180,0
-oltre 50 fino a 100	19	1.666,6	2.059,4	1.666,6	1.655,2
-oltre 100 fino a 200	4	493,6	560,0	493,6	490,0
a vapore a condensazione (C)	134	21.714,6	25.225,2	21.595,5	19.709,7
-fino a 25	54	468,3	564,1	446,7	395,0
-oltre 25 fino a 50	5	193,8	285,5	193,8	174,8
-oltre 50 fino a 100	14	985,5	1.228,2	985,5	913,1
-oltre 100 fino a 200	21	3.327,0	3.907,5	3.314,5	3.070,8
-oltre 200 fino a 500	28	8.880,0	10.250,0	8.795,0	8.102,2
-oltre 500	12	7.860,0	8.990,0	7.860,0	7.053,8
ciclo combinato (CC)	53	23.589,8	30.654,2	23.049,2	22.604,9
-fino a 25	4	48,7	60,9	46,0	44,5
-oltre 50 fino a 100	2	120,0	157,9	120,0	117,0
-oltre 100 fino a 200	1	115,5	144,6	115,5	113,0
-oltre 200 fino a 500	33	12.779,4	17.657,1	12.437,2	12.213,6
-oltre 500	13	10.526,2	12.633,8	10.330,5	10.116,9
turbo espansione (TE)	12	37,4	42,6	34,8	33,2
-fino a 25	12	37,4	42,6	34,8	33,2
ripotenziato (RP)	8	5.317,6	6.160,0	5.317,6	5.068,4
-oltre 200 fino a 500	4	1.737,6	2.040,0	1.737,6	1.594,4
-oltre 500	4	3.580,0	4.120,0	3.580,0	3.474,0
altro genere (V)	7	167,3	204,4	165,7	158,7
-fino a 25	5	53,3	64,3	51,7	50,4
-oltre 25 fino a 50	1	42,0	50,0	42,0	39,9
-oltre 50 fino a 100	1	72,0	90,0	72,0	68,4
Totale A	1.034	54.100,1	66.288,5	53.410,0	50.772,9

Autoproduttori

Sezioni	Potenza nominale		Potenza efficiente	
	Motori primi	Generatori	Lorda	Netta
n.	MW	MVA	MW	MW

77	127,5	155,6	123,3	119,1
77	127,5	155,6	123,3	119,1
5	36,8	42,8	36,8	36,1
5	36,8	42,8	36,8	36,1
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
14	211,4	276,7	207,1	195,4
9	54,9	68,7	50,6	47,5
5	156,5	208,0	156,5	147,9
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
1	58,0	73,3	58,0	55,3
-	-	-	-	-
1	58,0	73,3	58,0	55,3
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
13	124,2	162,0	116,1	113,0
13	124,2	162,0	116,1	113,0
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
2	14,0	18,4	13,6	12,9
2	14,0	18,4	13,6	12,9
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
112	572,0	728,8	554,9	531,8

ITALIA

Sezioni	Potenza nominale		Potenza efficiente	
	Motori primi	Generatori	Lorda	Netta
n.	MW	MVA	MW	MW

851	911,9	1.129,7	890,8	858,7
851	911,9	1.129,7	890,8	858,7
51	2.525,7	3.070,8	2.516,6	2.494,4
22	179,5	205,3	171,4	169,3
6	186,0	246,1	185,0	180,0
19	1.666,6	2.059,4	1.666,6	1.655,2
4	493,6	560,0	493,6	490,0
148	21.926,1	25.502,0	21.802,6	19.905,2
63	523,3	632,8	497,3	442,5
10	350,3	493,5	350,3	322,7
14	985,5	1.228,2	985,5	913,1
21	3.327,0	3.907,5	3.314,5	3.070,8
28	8.880,0	10.250,0	8.795,0	8.102,2
12	7.860,0	8.990,0	7.860,0	7.053,8
54	23.647,8	30.727,5	23.107,2	22.660,3
4	48,7	60,9	46,0	44,5
3	178,0	231,2	178,0	172,3
1	115,5	144,6	115,5	113,0
33	12.779,4	17.657,1	12.437,2	12.213,6
13	10.526,2	12.633,8	10.330,5	10.116,9
25	161,6	204,6	150,9	146,2
25	161,6	204,6	150,9	146,2
8	5.317,6	6.160,0	5.317,6	5.068,4
4	1.737,6	2.040,0	1.737,6	1.594,4
4	3.580,0	4.120,0	3.580,0	3.474,0
9	181,3	222,8	179,3	171,6
7	67,3	82,8	65,3	63,3
1	42,0	50,0	42,0	39,9
1	72,0	90,0	72,0	68,4
1.146	54.672,1	67.017,4	53.965,0	51.304,8

	n.	Motori primi MW	Generatori MVA	Lorda MW	Netta MW
B) Impianti con produzione combinata di energia elettrica e calore					
a combustione interna (CIC)	516	898,4	1.098,5	872,3	834,6
-fino a 25	515	859,4	1.050,8	834,3	798,6
-oltre 25 fino a 50	1	39,0	47,7	38,0	36,0
a turbine a gas (TGC)	29	239,2	294,3	237,4	233,8
-fino a 25	27	82,2	104,3	80,4	79,0
-oltre 25 fino a 50	1	30,0	37,5	30,0	29,9
-oltre 100 fino a 200	1	127,0	152,5	127,0	125,0
a ciclo combinato (CCC)	107	16.772,4	20.137,4	16.537,5	16.154,2
-fino a 25	29	218,9	267,6	213,5	204,5
-oltre 25 fino a 50	17	850,4	1.055,5	792,0	768,5
-oltre 50 fino a 100	12	831,1	1.073,7	801,0	773,9
-oltre 100 fino a 200	24	3.927,5	4.549,7	3.824,6	3.734,3
-oltre 200 fino a 500	21	7.948,7	9.541,8	7.913,9	7.735,0
-oltre 500	4	2.995,8	3.649,0	2.992,5	2.938,0
a vapore a contropressione (CPC)	30	366,4	449,0	361,2	341,1
-fino a 25	26	101,7	122,0	99,9	94,9
-oltre 25 fino a 50	-	-	-	-	-
-oltre 50 fino a 100	4	264,7	327,0	261,3	246,2
condensazione e spillamento (CSC)	49	724,1	893,6	700,5	652,6
-fino a 25	42	407,3	515,0	388,0	358,7
-oltre 25 fino a 50	4	132,8	166,6	128,5	121,8
-oltre 50 fino a 100	3	184,0	212,0	184,0	172,1
Totale B	731	19.000,4	22.872,8	18.708,8	18.216,3
Totale impianti (A + B)	1.765	73.100,5	89.161,4	72.118,8	68.989,3
geotermoelettrici	34	882,5	1.037,0	772,0	728,1
in complesso	1.799	73.983,0	90.198,4	72.890,8	69.717,4

Autoproduttori

Sezioni	Potenza nominale		Potenza efficiente	
	Motori primi n. MW	Generatori MVA	Lorda MW	Netta MW

315	556,7	688,1	547,9	533,4
314	525,0	649,6	516,2	502,7
1	31,8	38,4	31,8	30,8
111	686,6	851,3	654,5	641,1
108	575,5	710,6	547,0	537,7
3	111,1	140,7	107,5	103,5
-	-	-	-	-
55	2.429,9	2.931,3	2.391,2	2.334,4
37	379,3	478,9	364,1	354,1
9	367,6	463,5	349,2	340,9
3	202,1	261,3	197,0	193,8
2	265,7	326,2	265,7	246,4
4	1.215,2	1.401,4	1.215,2	1.199,2
-	-	-	-	-
128	960,4	1.210,0	940,3	892,0
123	684,5	866,2	667,5	635,9
3	128,9	156,3	125,8	118,7
2	147,0	187,5	147,0	137,4
51	1.170,8	1.453,5	1.132,8	1.054,2
35	278,8	348,3	267,2	251,9
7	272,0	314,0	245,6	221,6
9	620,0	791,2	620,0	580,6
660	5.804,5	7.134,2	5.666,8	5.455,1
772	6.376,5	7.863,0	6.221,7	5.986,9
-	-	-	-	-
772	6.376,5	7.863,0	6.221,7	5.986,9

ITALIA

Sezioni	Potenza nominale		Potenza efficiente	
	Motori primi n. MW	Generatori MVA	Lorda MW	Netta MW

831	1.455,1	1.786,6	1.420,2	1.368,0
829	1.384,3	1.700,5	1.350,5	1.301,3
2	70,8	86,1	69,8	66,8
140	925,8	1.145,6	891,9	875,0
135	657,7	814,9	627,4	616,6
4	141,1	178,2	137,5	133,3
1	127,0	152,5	127,0	125,0
162	19.202,3	23.068,7	18.928,7	18.488,5
66	598,2	746,6	577,6	558,6
26	1.218,0	1.518,9	1.141,2	1.109,4
15	1.033,2	1.335,0	998,0	967,6
26	4.193,2	4.875,9	4.090,3	3.980,7
25	9.163,9	10.943,2	9.129,1	8.934,2
4	2.995,8	3.649,0	2.992,5	2.938,0
158	1.326,8	1.659,0	1.301,4	1.233,2
149	786,2	988,2	767,4	730,8
3	128,9	156,3	125,8	118,7
6	411,7	514,5	408,3	383,6
100	1.894,9	2.347,1	1.833,3	1.706,8
77	686,1	863,3	655,2	610,6
11	404,8	480,6	374,1	343,5
12	804,0	1.003,2	804,0	752,7
1.391	24.804,9	30.007,0	24.375,5	23.671,5
2.537	79.476,9	97.024,4	78.340,5	74.976,2
34	882,5	1.037,0	772,0	728,1
2.571	80.359,4	98.061,4	79.112,5	75.704,3

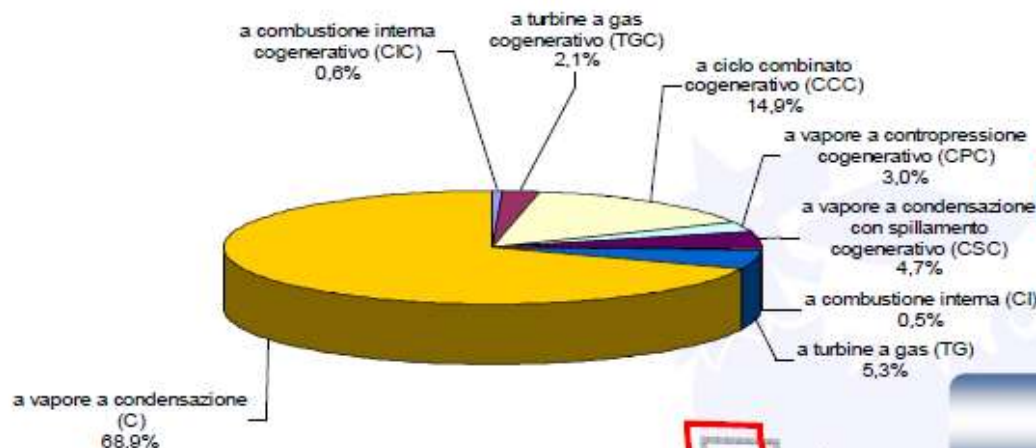
	Impianti n.	Potenza efficiente lorda kW	Impianti n.	Potenza efficiente lorda kW	Potenza efficiente lorda %
	2009		2010		2010/2009
Idrica	2.249	17.721.465	2.729	17.876.169	0,9%
0 - 1 MW	1.270	465.561	1.727	523.491	12,4%
1 - 10 MW	682	2.189.647	700	2.210.451	1,0%
> 10 MW	297	15.066.257	302	15.142.227	0,5%
Eolica	294	4.897.938	487	5.814.281	18,7%
Fotovoltaica (1)	71.256	1.142.211	155.977	3.469.880	203,8%
Geotermica	32	737.000	33	772.000	4,7%
Bioenergie (2)	419	2.018.554	669	2.351.545	16,5%
Sola produzione di energia elettrica	292	1.249.436	484	1.426.830	14,2%
Solidi	66	706.098	82	677.845	-4,0%
- rifiuti solidi urbani	41	406.941	45	437.900	7,6%
- biomasse solide	27	299.157	39	239.945	-19,8%
Biogas	207	279.908	352	342.074	22,2%
- da rifiuti	178	255.633	210	283.472	10,9%
- da fanghi	4	1.162	31	4.338	273,3%
- da deiezioni animali	12	7.830	76	21.661	176,6%
- da attività agricole e forestali	14	15.283	38	32.603	113,3%
Bioliquidi	22	263.430	52	406.911	54,5%
- oli vegetali grezzi	17	192.600	43	327.339	70,0%
- altri bioliquidi	5	70.830	9	79.572	12,3%
Produzione combinata di energia elettrica e calore	134	769.118	191	924.715	20,2%
Solidi	53	549.308	56	564.814	2,8%
- rifiuti solidi urbani	28	375.023	25	360.029	-4,0%
- biomasse solide	26	174.285	32	204.785	17,5%
Biogas	65	98.273	96	165.630	68,5%
- da rifiuti	16	43.621	18	57.866	32,7%
- da fanghi	16	8.760	16	10.231	16,8%
- da deiezioni animali	16	9.340	19	19.710	111,0%
- da attività agricole e forestali	17	36.552	43	77.823	112,9%
Bioliquidi	20	121.537	45	194.271	59,8%
- oli vegetali grezzi	18	109.943	43	182.677	66,2%
- altri bioliquidi	2	11.594	2	11.594	0,0%
Totale	74.250	26.517.168	159.895	30.283.875	14,2%

Produzione elettrica in Italia dal 1999 al 2008

Produzione totale 208.481 GWh

► Largo utilizzo del **Ciclo Rankine** – vapore a condensazione

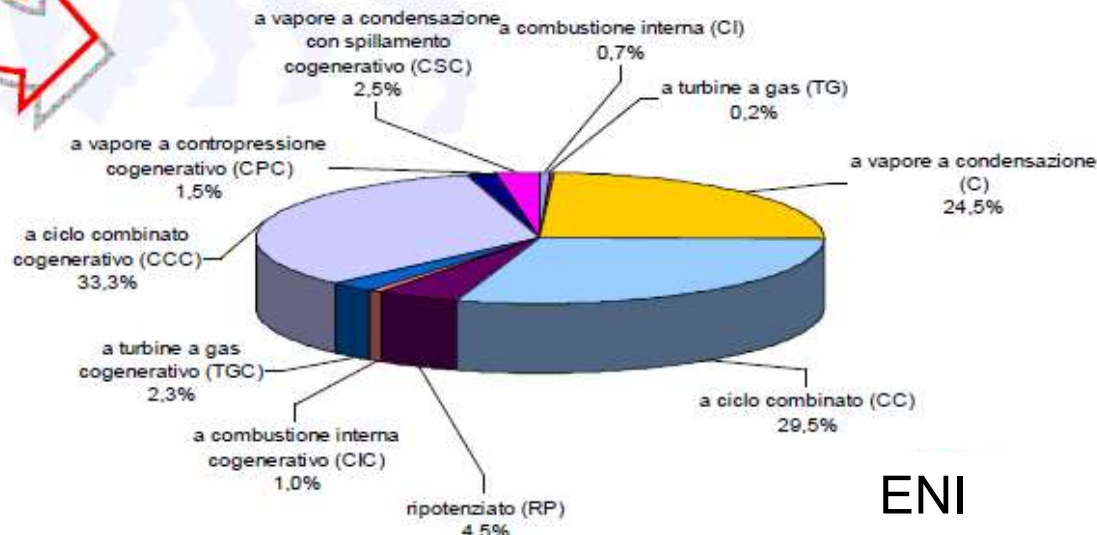
► Limitate applicazioni **TG** e **cicli combinati cogenerativi**



Produzione totale 264.743 GWh

► Forte espansione del **ciclo combinato** sia **cogenerativo** che a **condensazione**

► **Repowering** ed interventi di **efficientamento** del parco esistente



ENI

Producers, net exporters and net importers of electricity



Producers*	TWh	% of world total
People's Rep. of China	4 716	21.3
United States	4 327	19.6
Russian Federation	1 053	4.8
India	1 052	4.8
Japan	1 043	4.7
Canada	637	2.9
Germany	602	2.7
France	557	2.5
Brazil	532	2.4
Korea	520	2.4
Rest of the world	7 087	31.9
World	22 126	100.0

2011 data

Net exporters	TWh
France	56
Paraguay	46
Canada	37
Russian Federation	23
Czech Republic	17
People's Rep. of China	13
Bulgaria	11
United Arab Emirates	8
Sweden	7
Ukraine	6
Others	58
Total	282

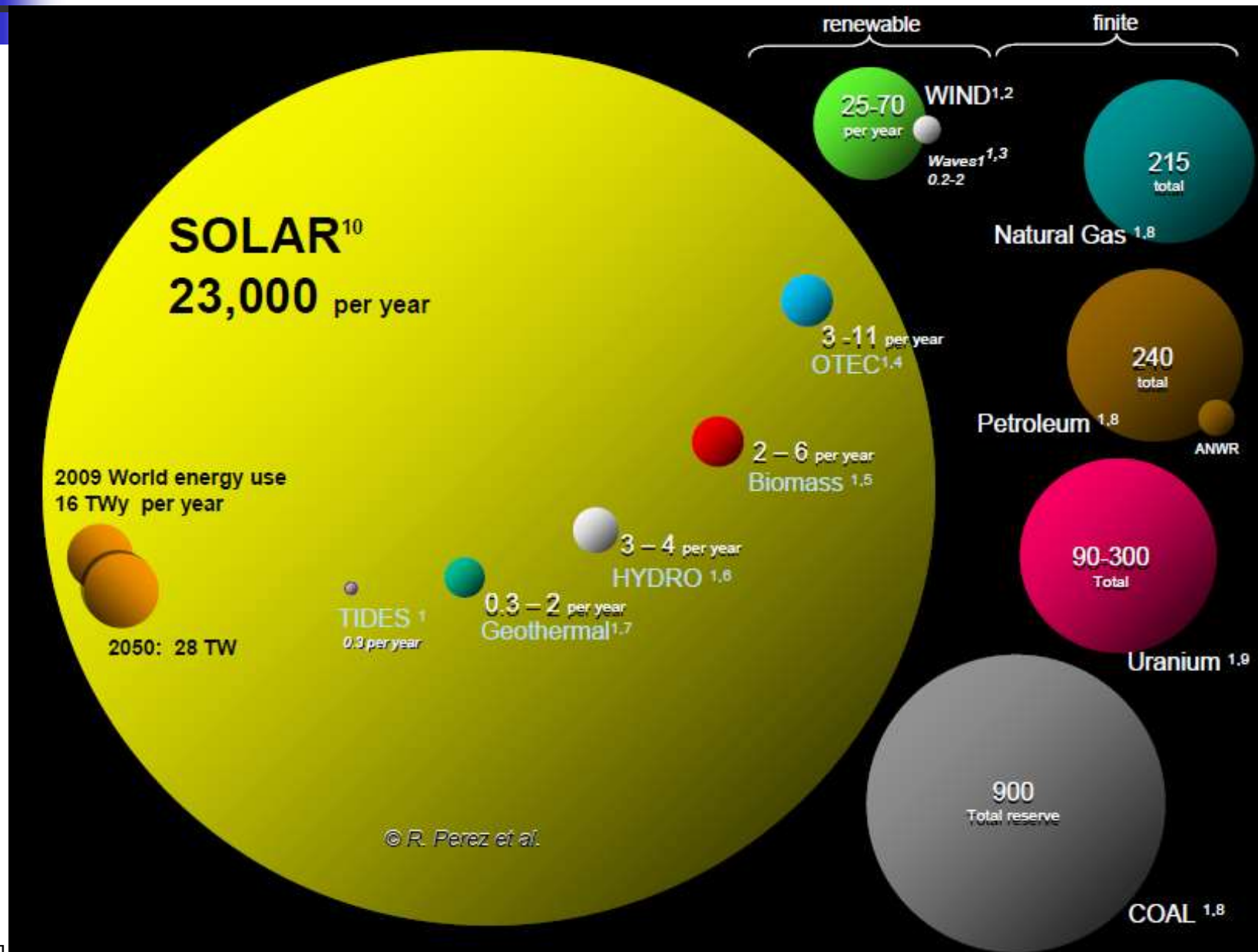
2011 data

Net importers	TWh
Italy	46
United States	37
Brazil	36
Finland	14
Argentina	10
Netherlands	9
Thailand	9
Hong Kong (China)	8
Austria	8
Croatia	8
Others	97
Total	282

*Gross production minus production from pumped storage plants. 2011 data

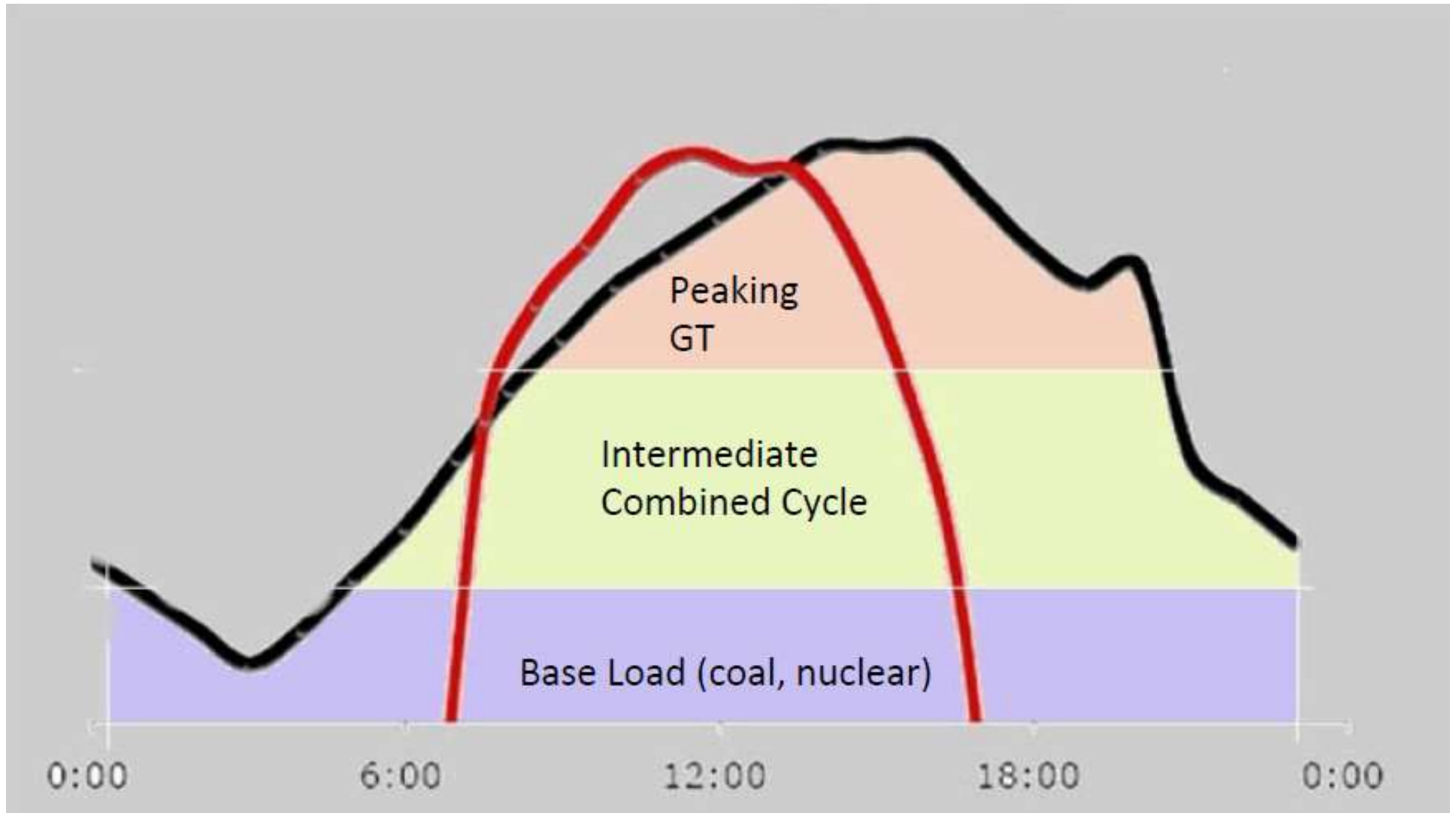
[IEA 2013]

Fonti rinnovabili di energia...

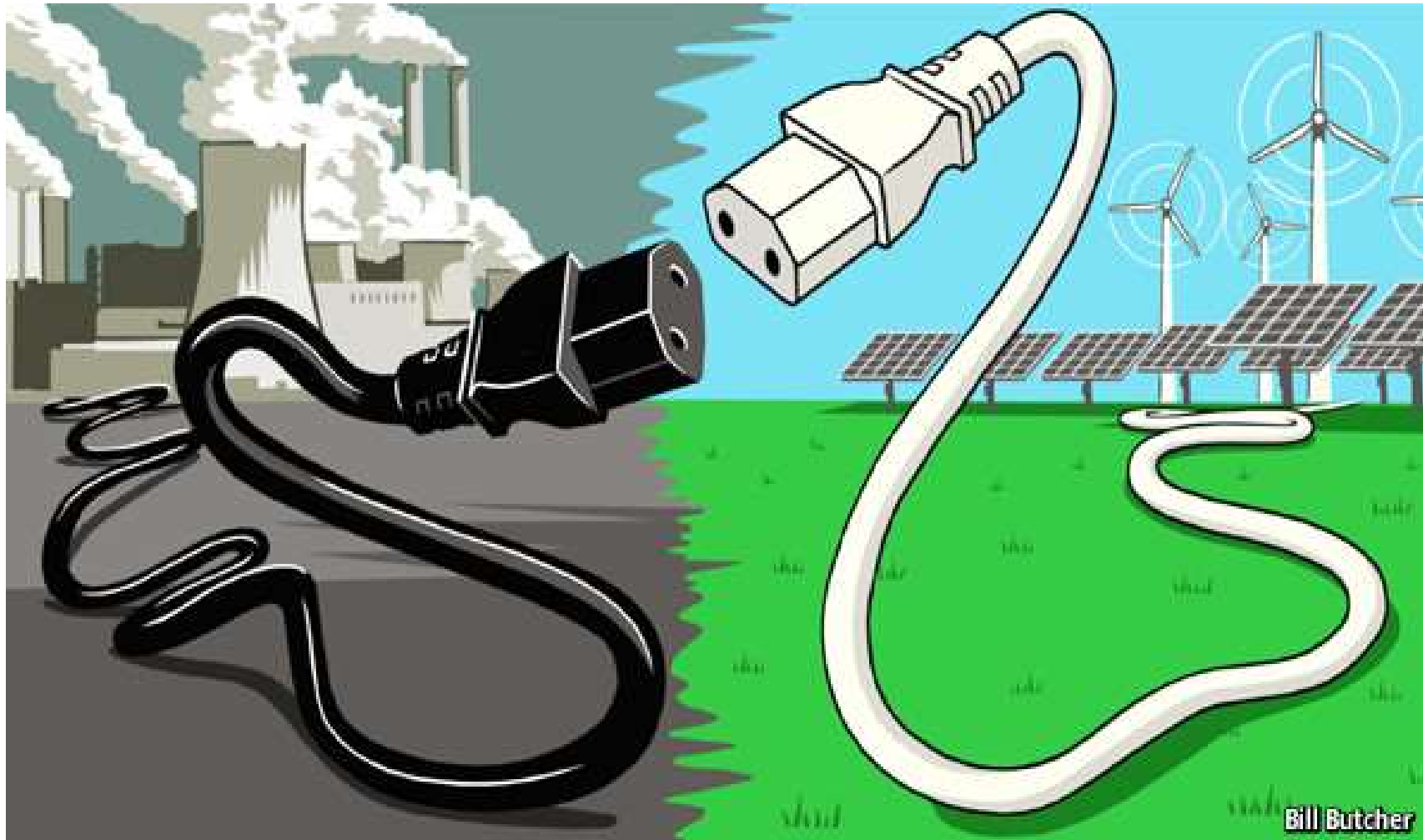


[Richard Perez]

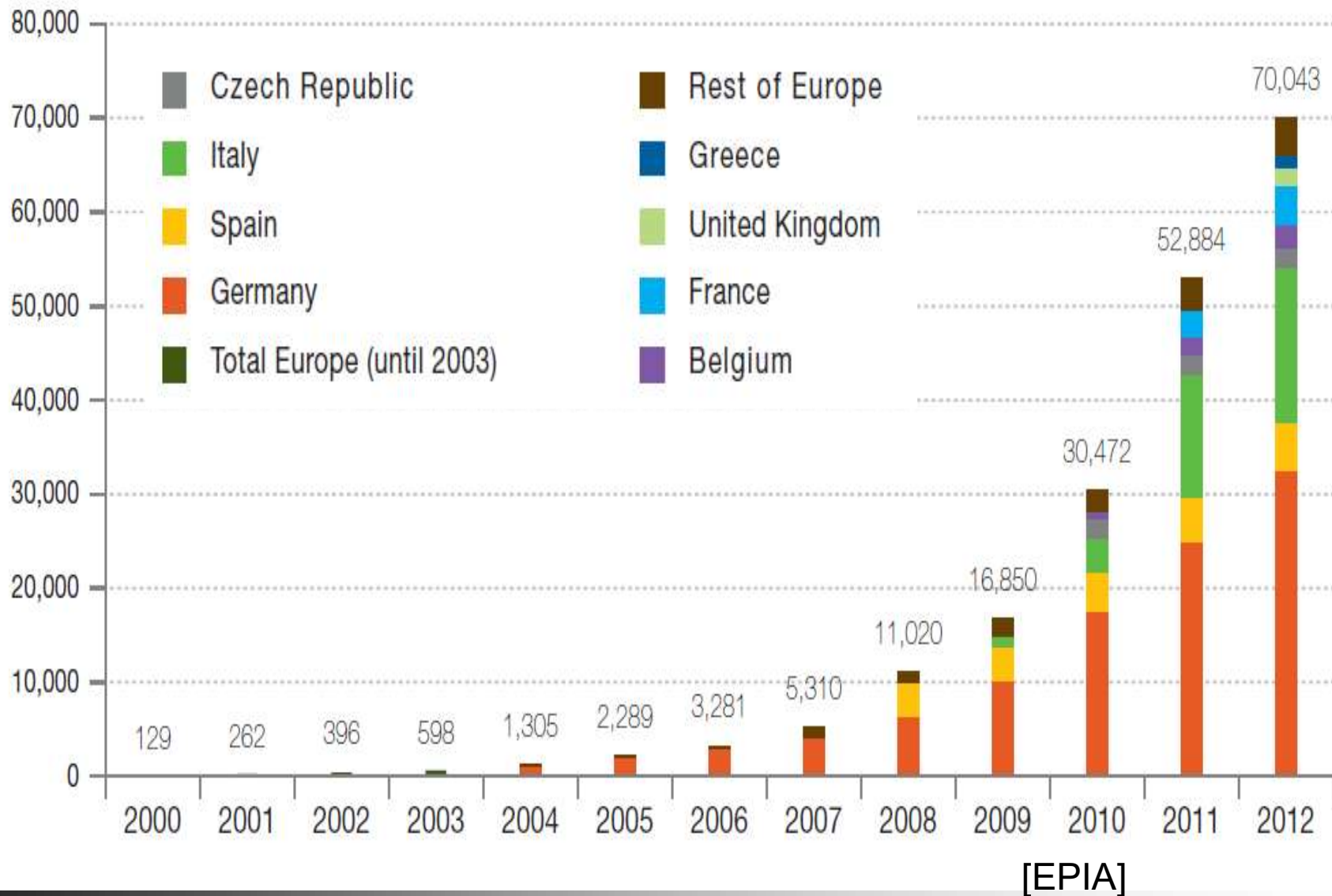
Typical electricity load profile

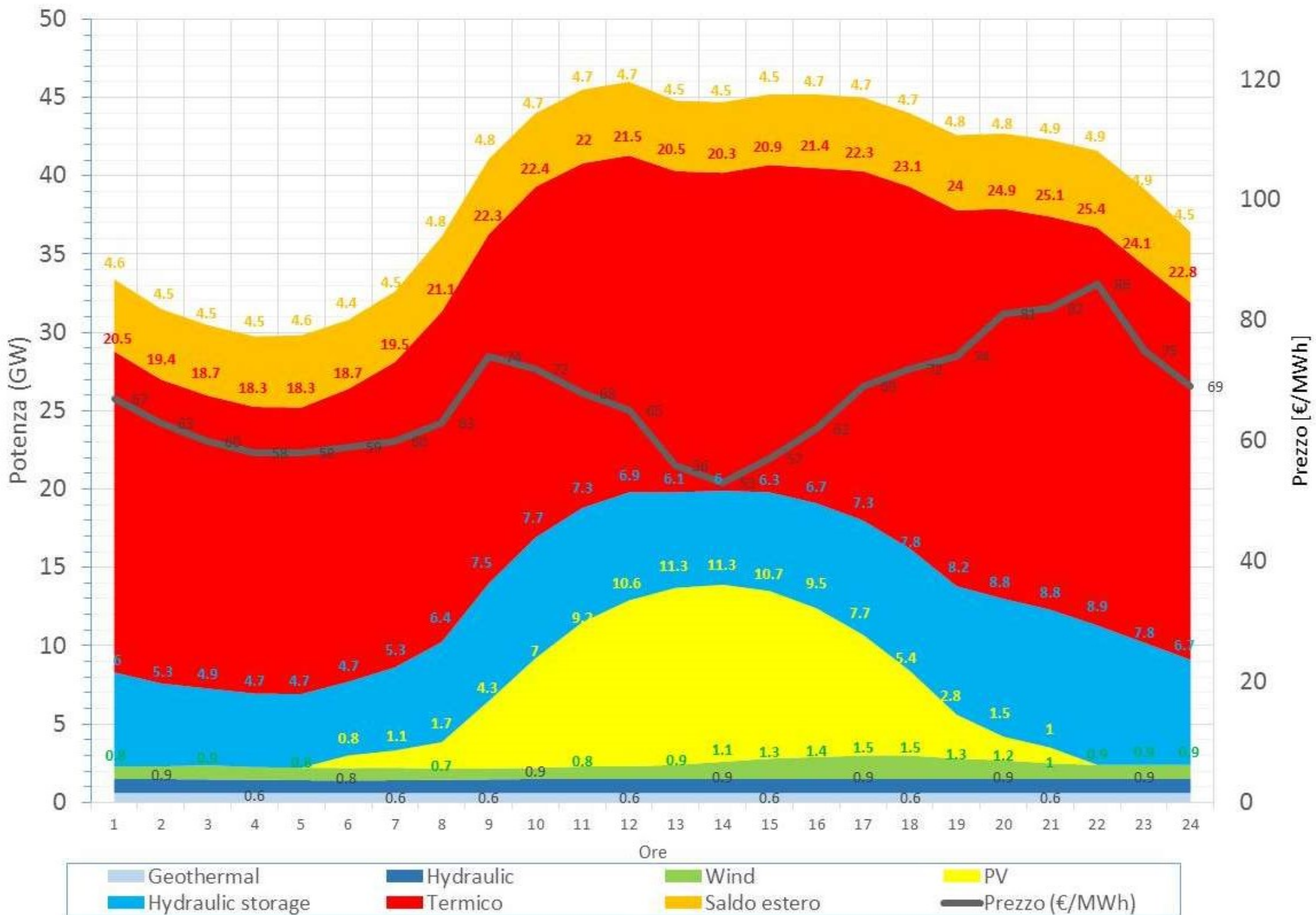


Case study: PV in Italy and Europe



Case study: PV in Italy and Europe

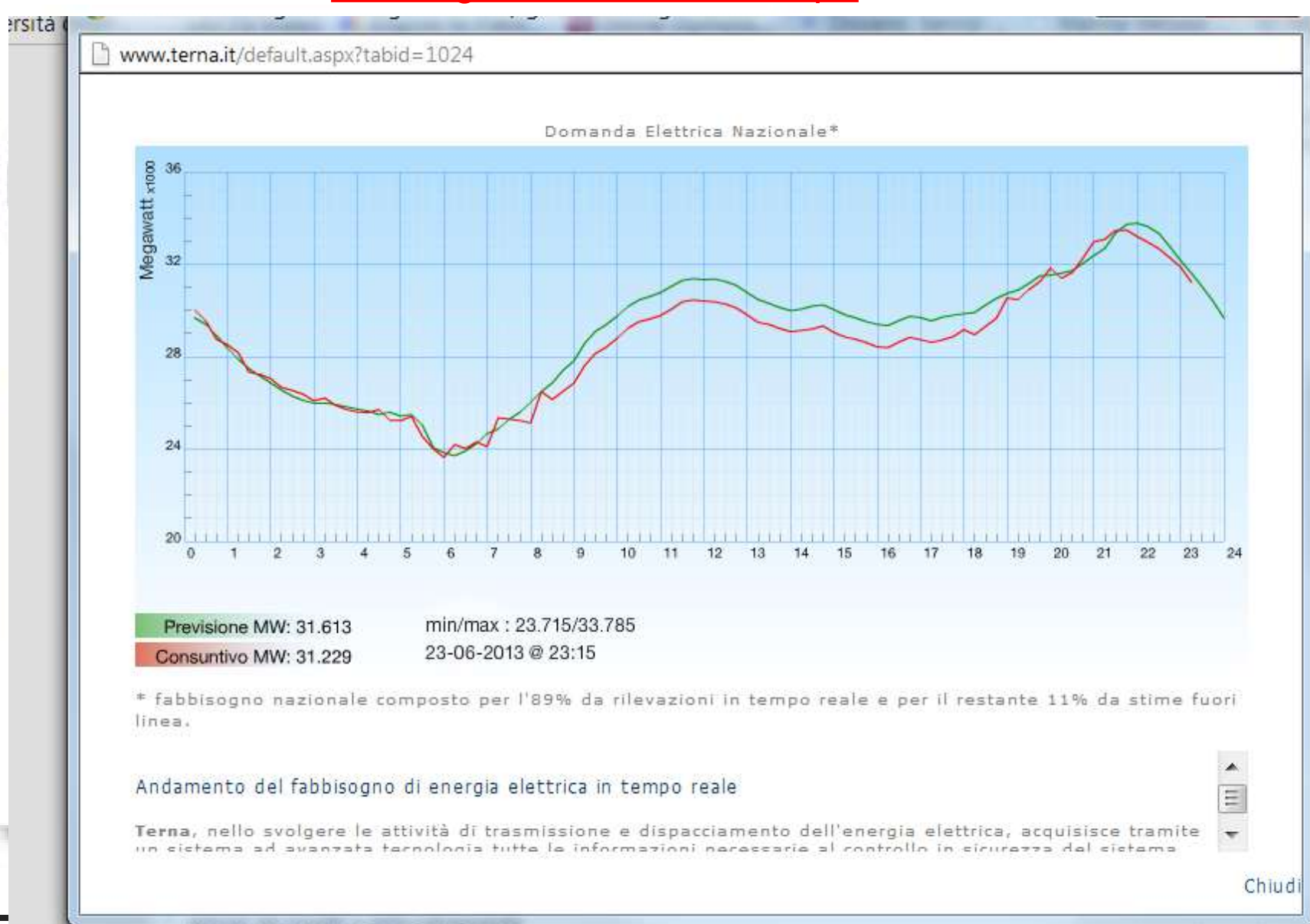




[Elaborated from Terna and <http://dataenergia.altervista.org/>]

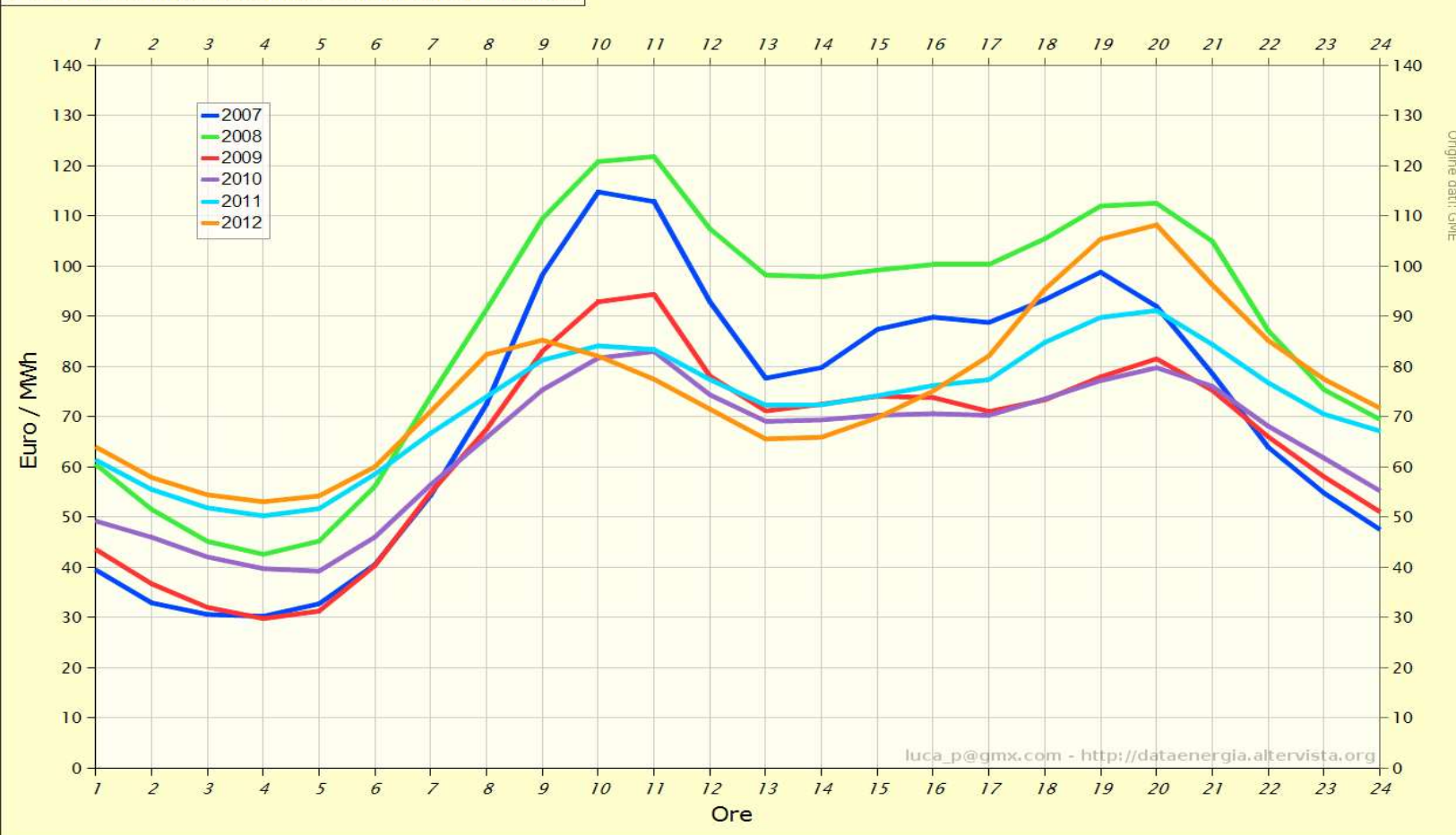
Daily load profile

Actual generation - Terna spa



Italy: electricity price

Prezzi medi orari sul mercato elettrico (MGP) in Italia



Il contatore fotovoltaico

[<http://dataenergia.altervista.org/>]

Totale conto energia



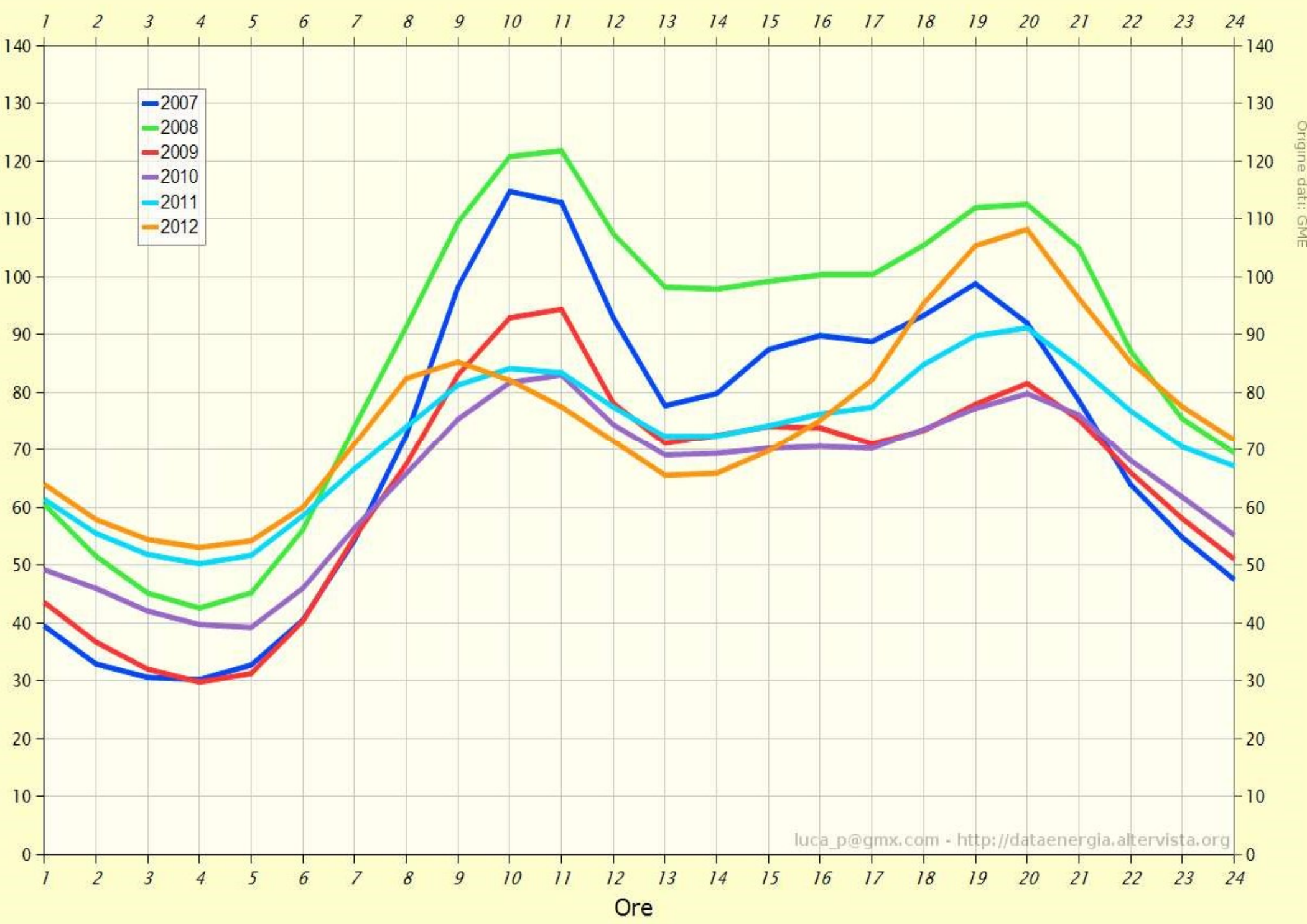
Totale impianti in esercizio

N.° Impianti: **526.463**
 Potenza (kW): **17.080.255**
 Costo annuo (€): **6.605.824.828**

Totale impianti a registro*

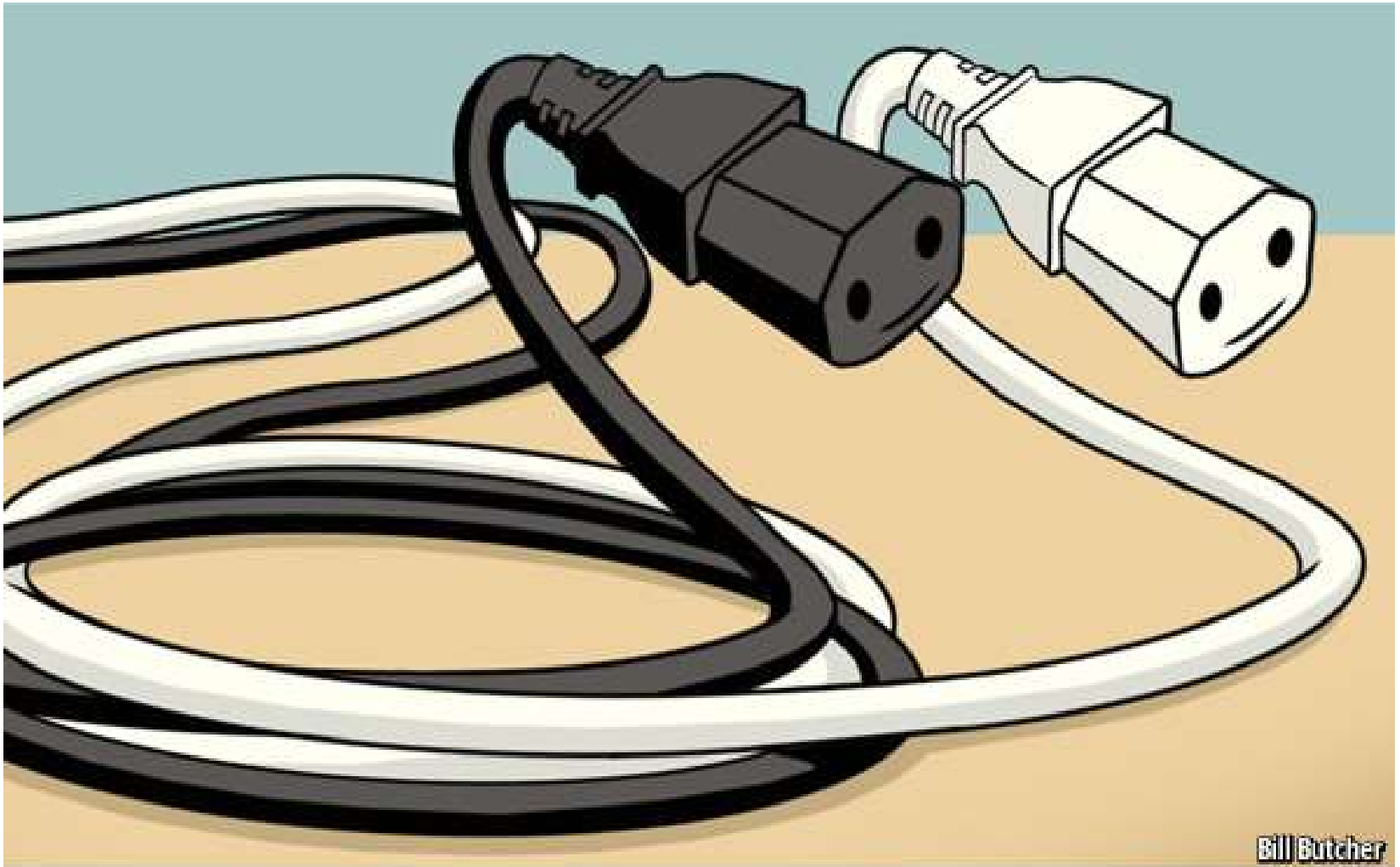
N.° Impianti: **4.779**
 Potenza (kW): **1.136.326**
 Costo annuo (€): **94.183.695**

ZZI medi orari sul mercato elettrico (MGP) in Italia





... possible? When? How?



Energy consumptions

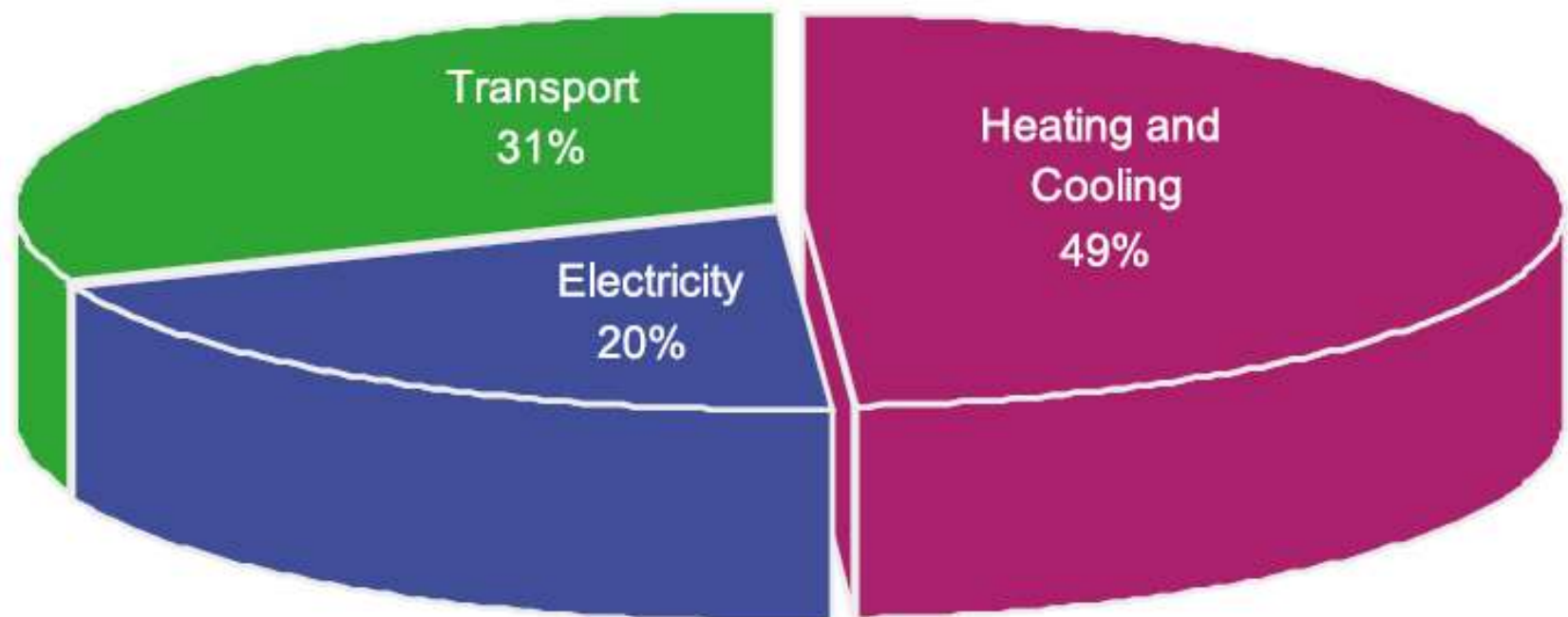


Figure 7: Final Energy demand in the European Union. (Source: EREC, 2006)

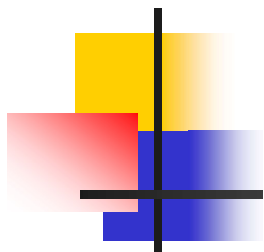


IMPIANTI A VAPORE

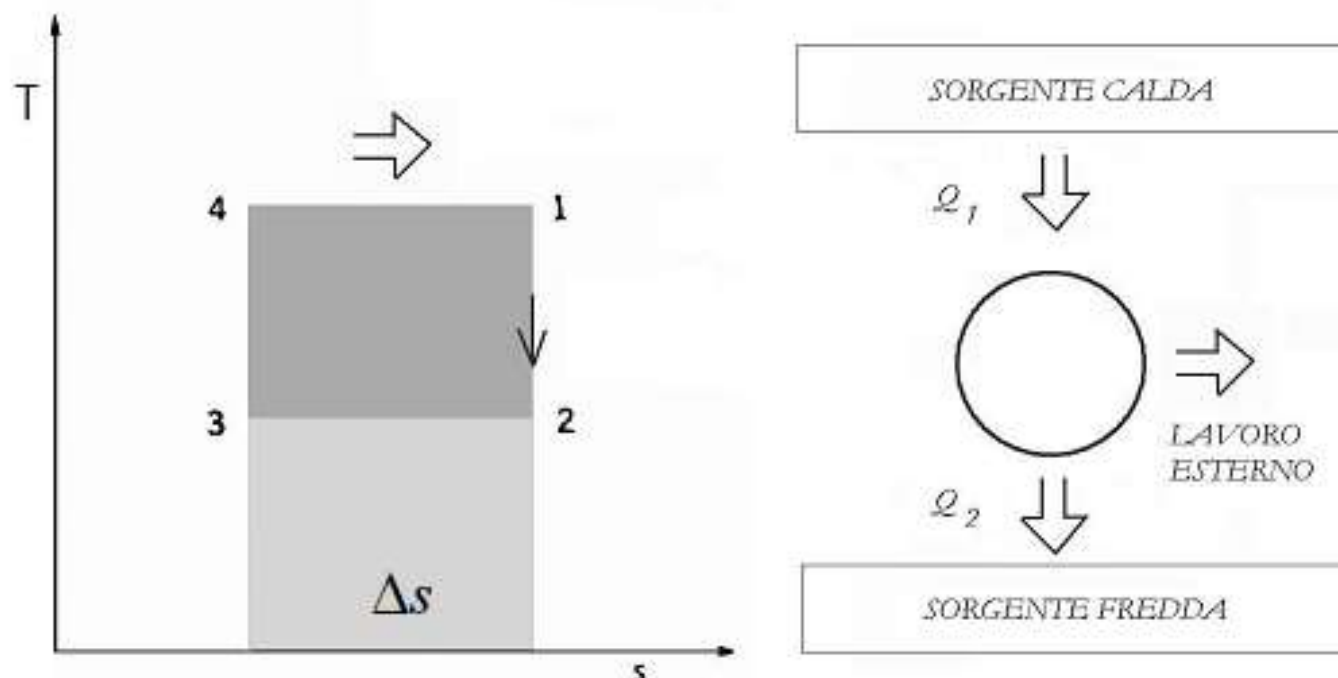
Esempio di centrale a carbone



Centrale termoelettrica di Monfalcone

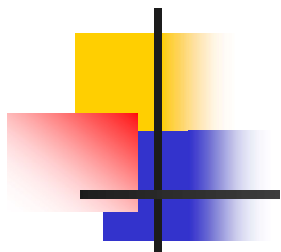


Ciclo di CARNOT (1) - Layout

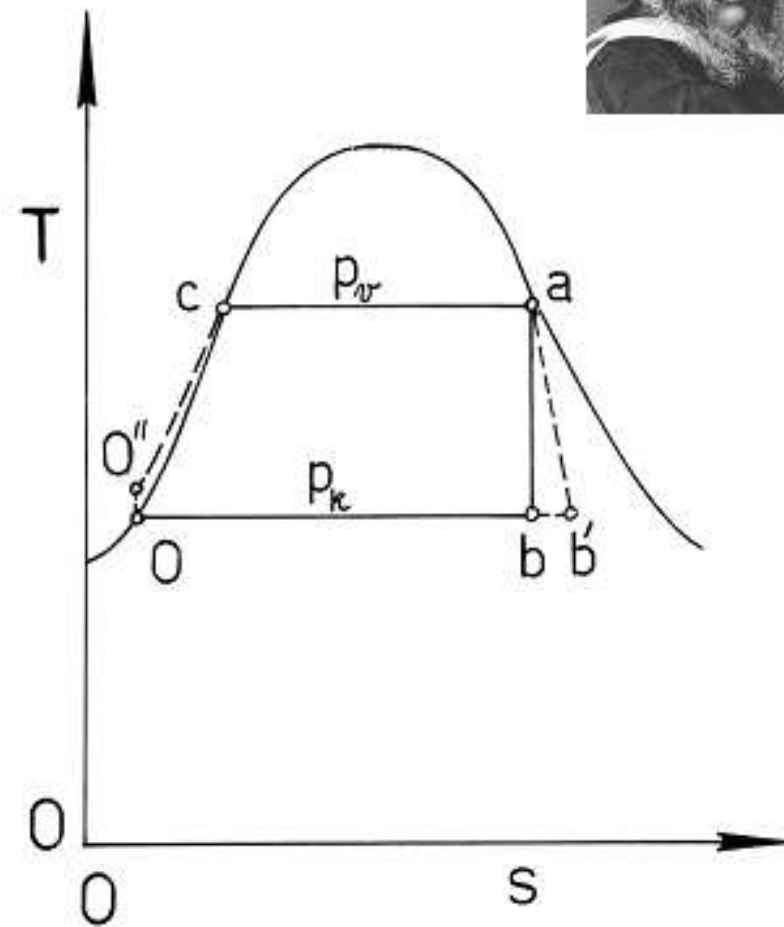
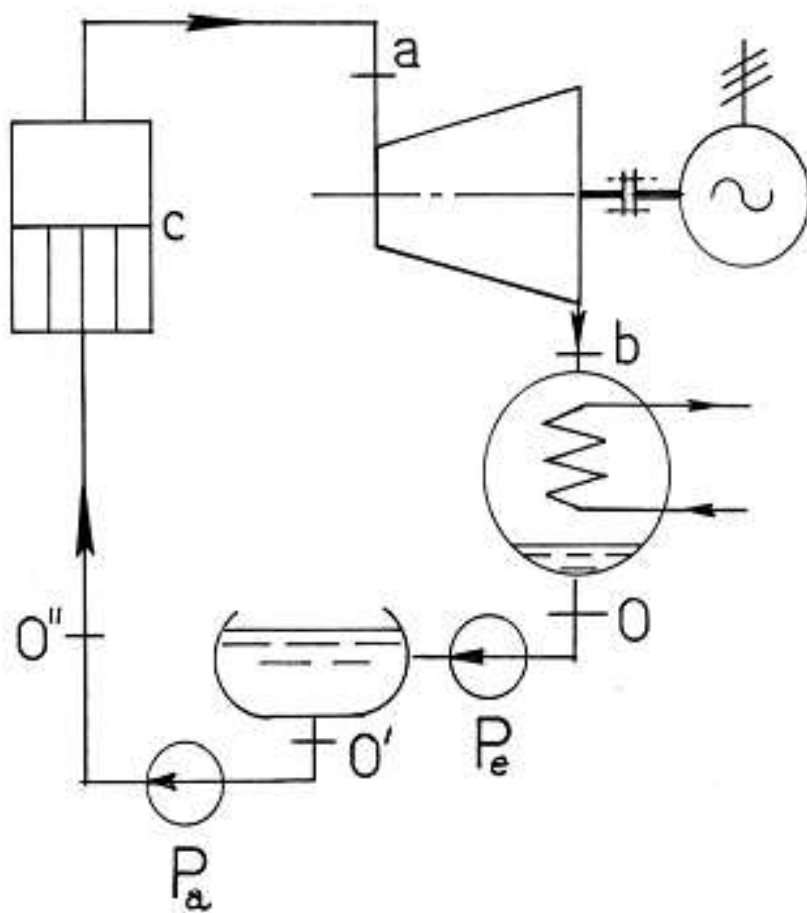


$$\eta_{carnot} = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Ciclo di Carnot diretto (*motore*)

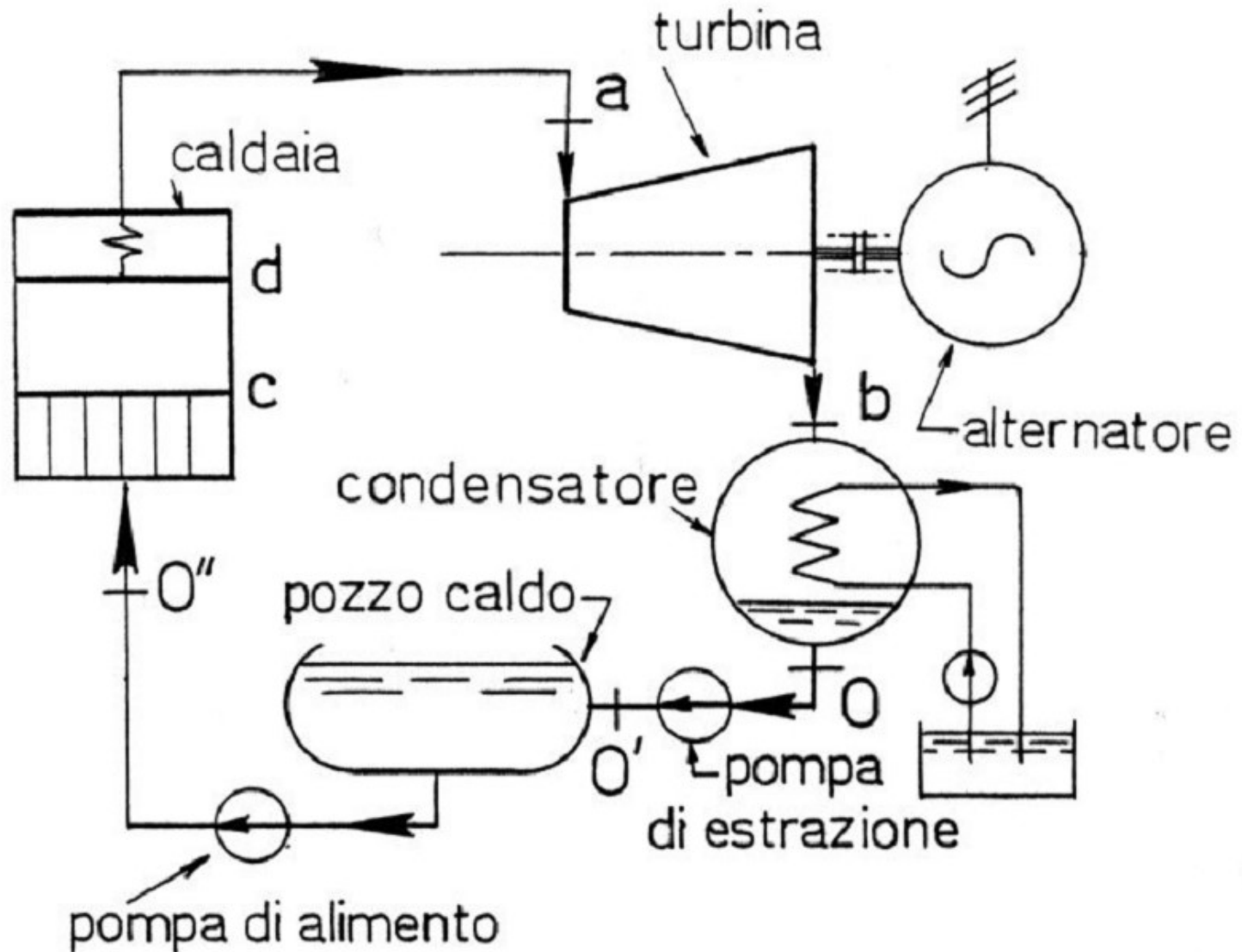


Ciclo di RANKINE (1) - Layout



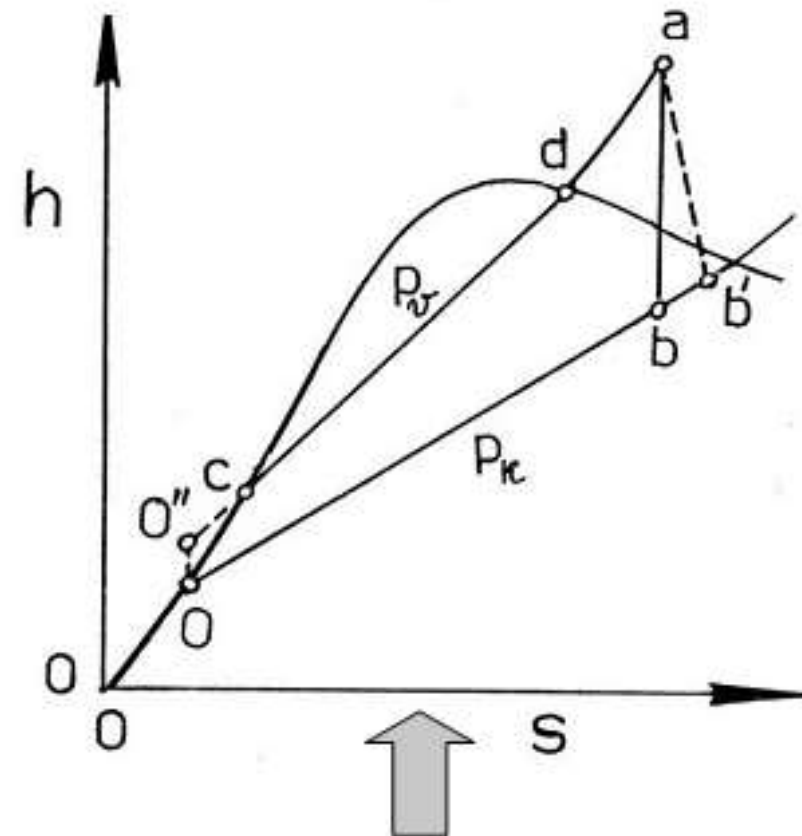
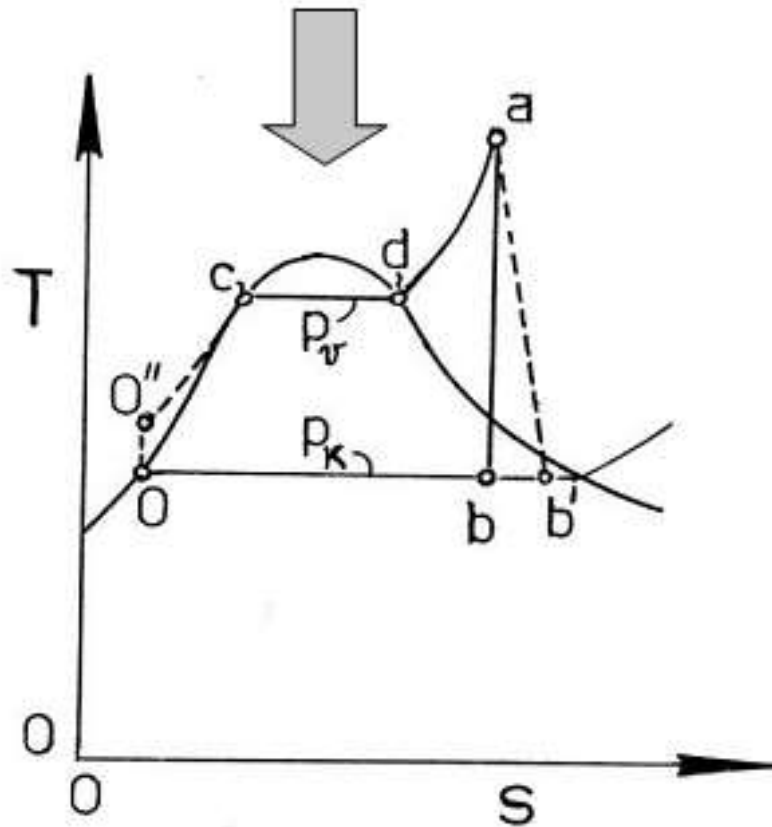
Ciclo a vapore saturo secco a condensazione (*Rankine*)

Ciclo di Hirn

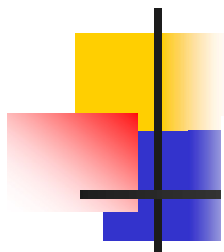


Ciclo di Hirn

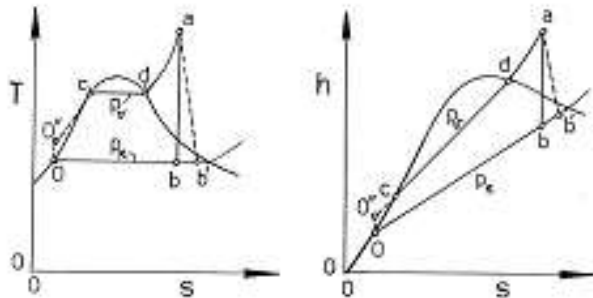
entropico: temperatura T - K, entropia s - kJ/(kg K)



entalpico (*Mollier*): entalpia h - kJ/kg, entropia s - kJ/(kg K)



Ciclo di HIRN (3) – Rendimenti



Lavoro della
turbina a vapore:

$$L_{reale} = h_a - h_{b'}$$

$$L_{teorico} = h_a - h_b$$

$$\eta_{it} = \frac{L_{reale}}{L_{teorico}} = \frac{h_a - h_{b'}}{h_a - h_b}$$

Calore introdotto nel ciclo: $Q_1 = h_a - h_{o'}$

Lavoro di pompaggio: $L_{pompa} = h_{o'} - h_o$ trascurabile

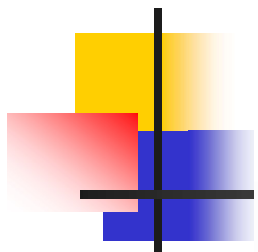
L = lavoro utile = lavoro reale - lavoro di pompaggio

Rendimento termodinamico del ciclo:

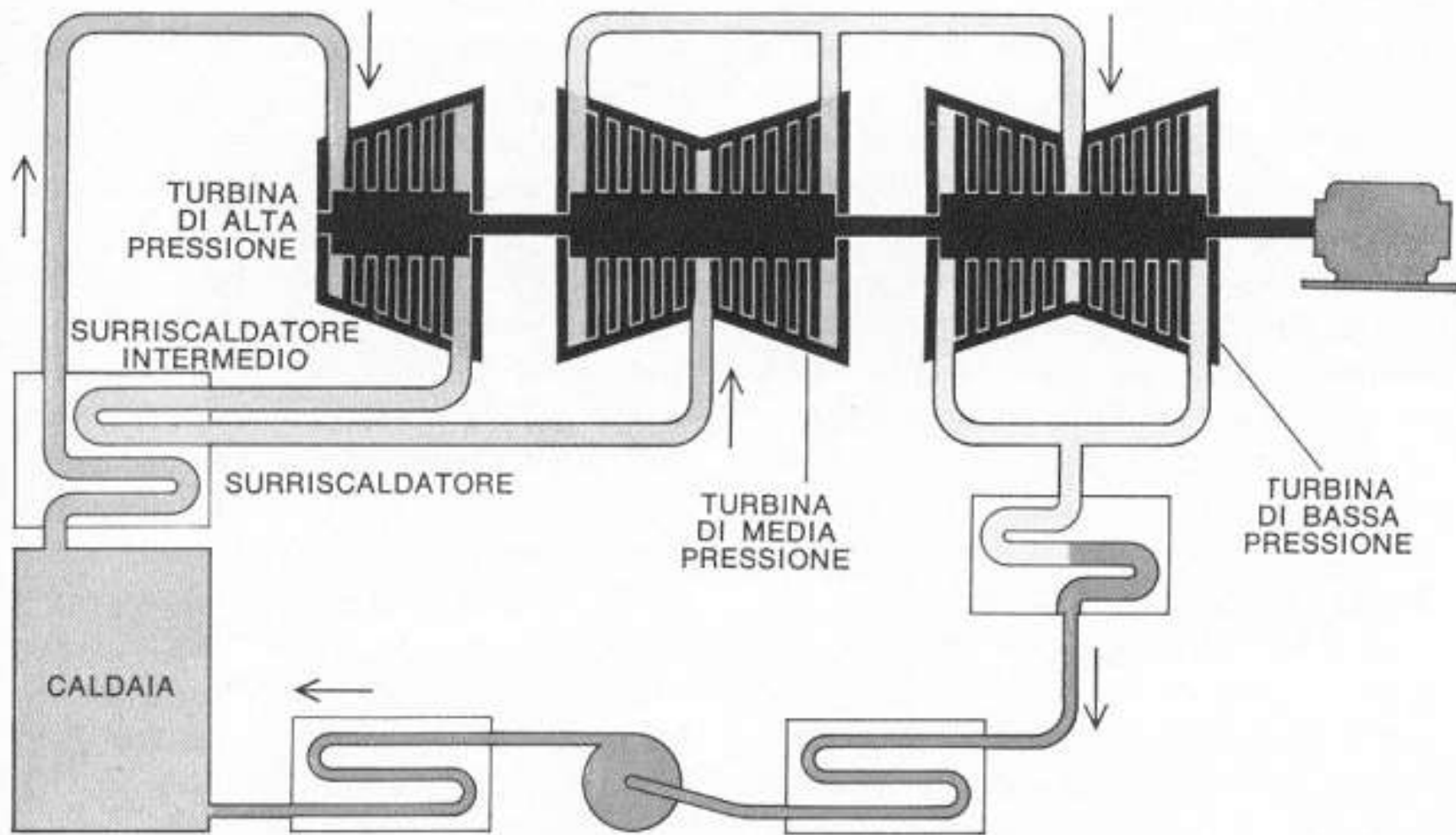
$$\eta_{th} = \frac{L_{teorico}}{Q_1} = \frac{h_a - h_b}{h_a - h_o}$$

Rendimento totale:

$$\eta = \frac{L_{reale}}{Q_1} = \frac{L_{teorico} \eta_{it}}{Q_1} = \frac{h_a - h_b}{h_a - h_o} \frac{h_a - h_{b'}}{h_a - h_b} = \eta_{th} \eta_{it} = \frac{h_a - h_{b'}}{h_a - h_o}$$

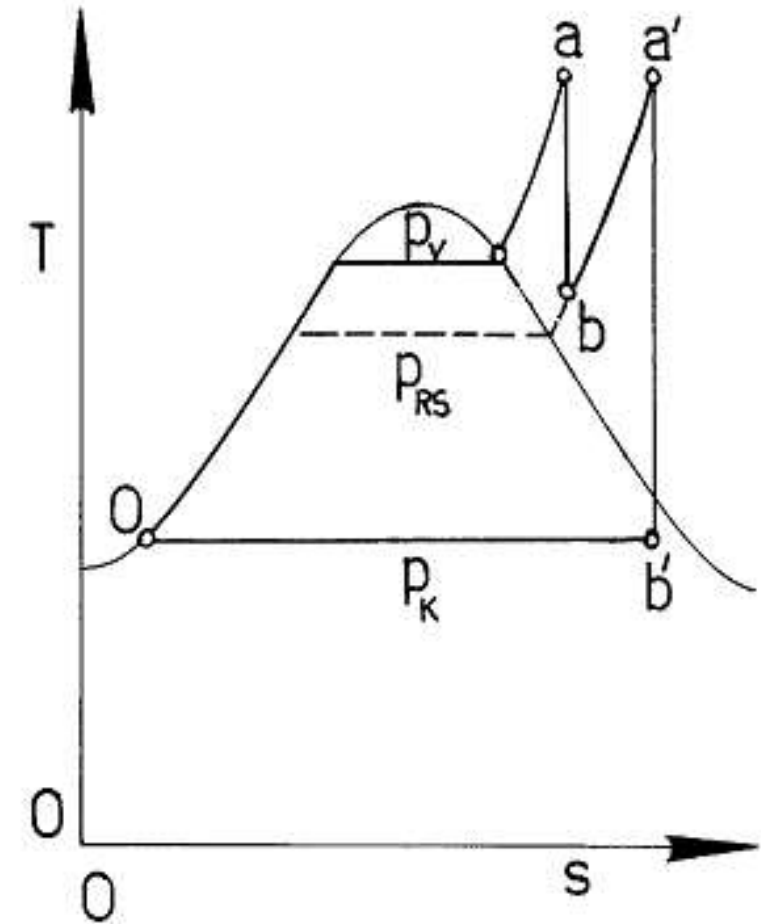
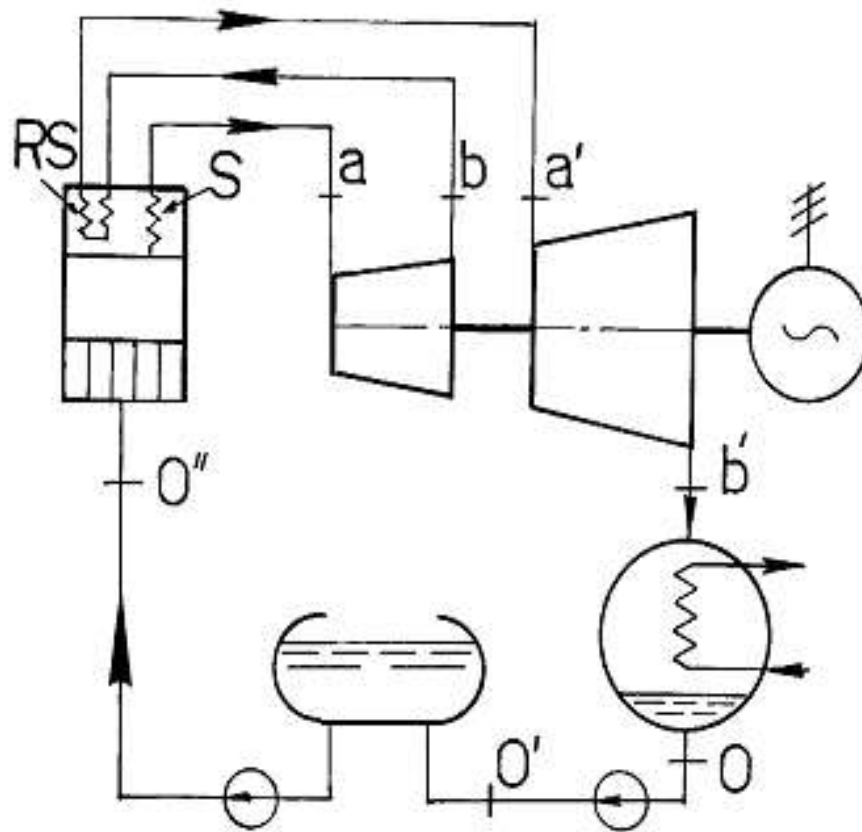


Ciclo SH - RH



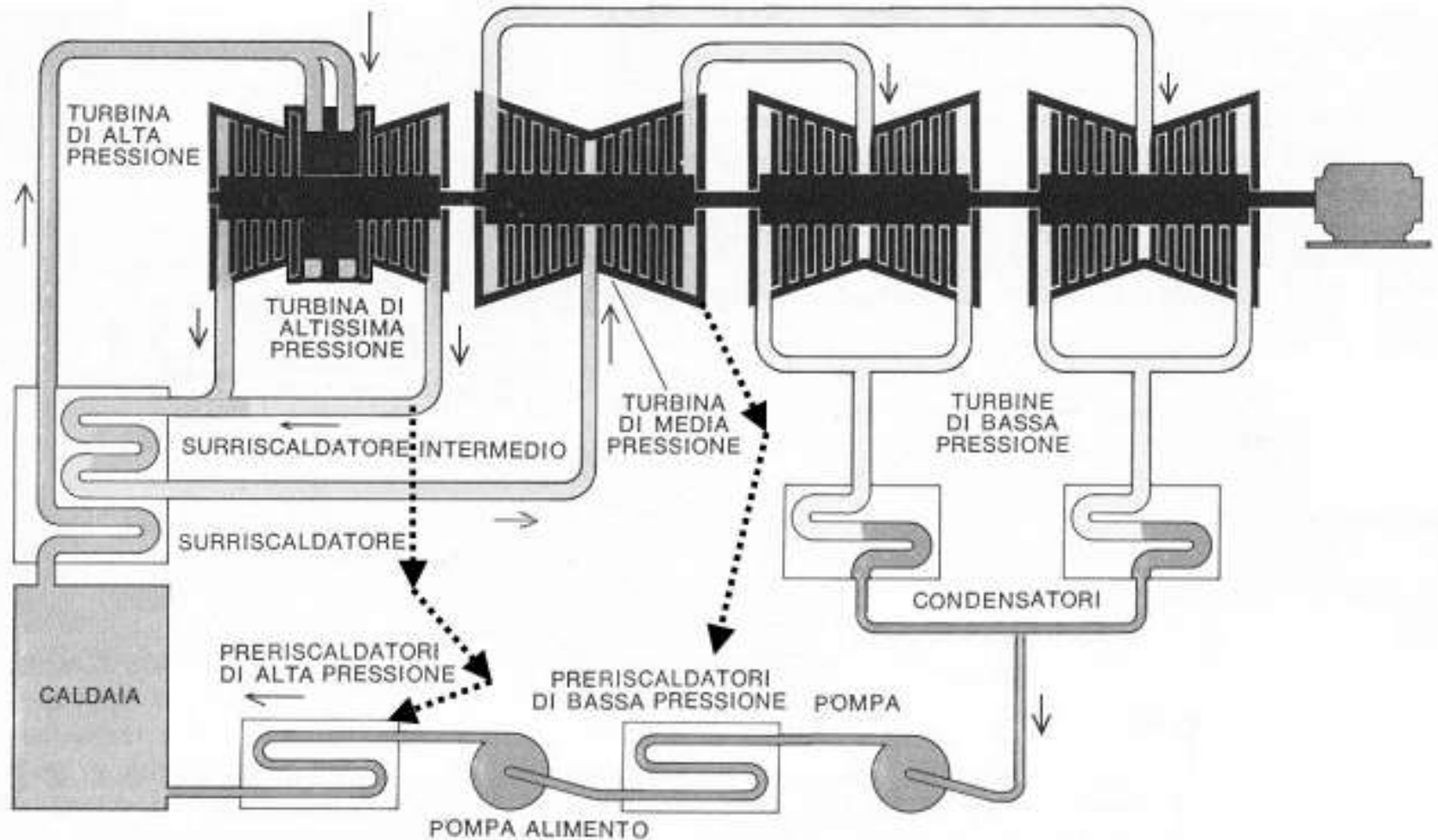
Layout impianto a vapore surriscaldato con
risurriscaldamento $P > 100 \text{ MW}$ $\eta > 40\%$

Ciclo con RISURRISCALDAMENTO (1) - Layout

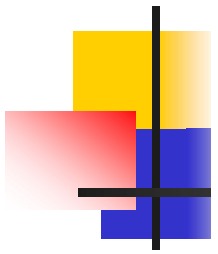


Ciclo a vapore risurriscaldato con condensazione

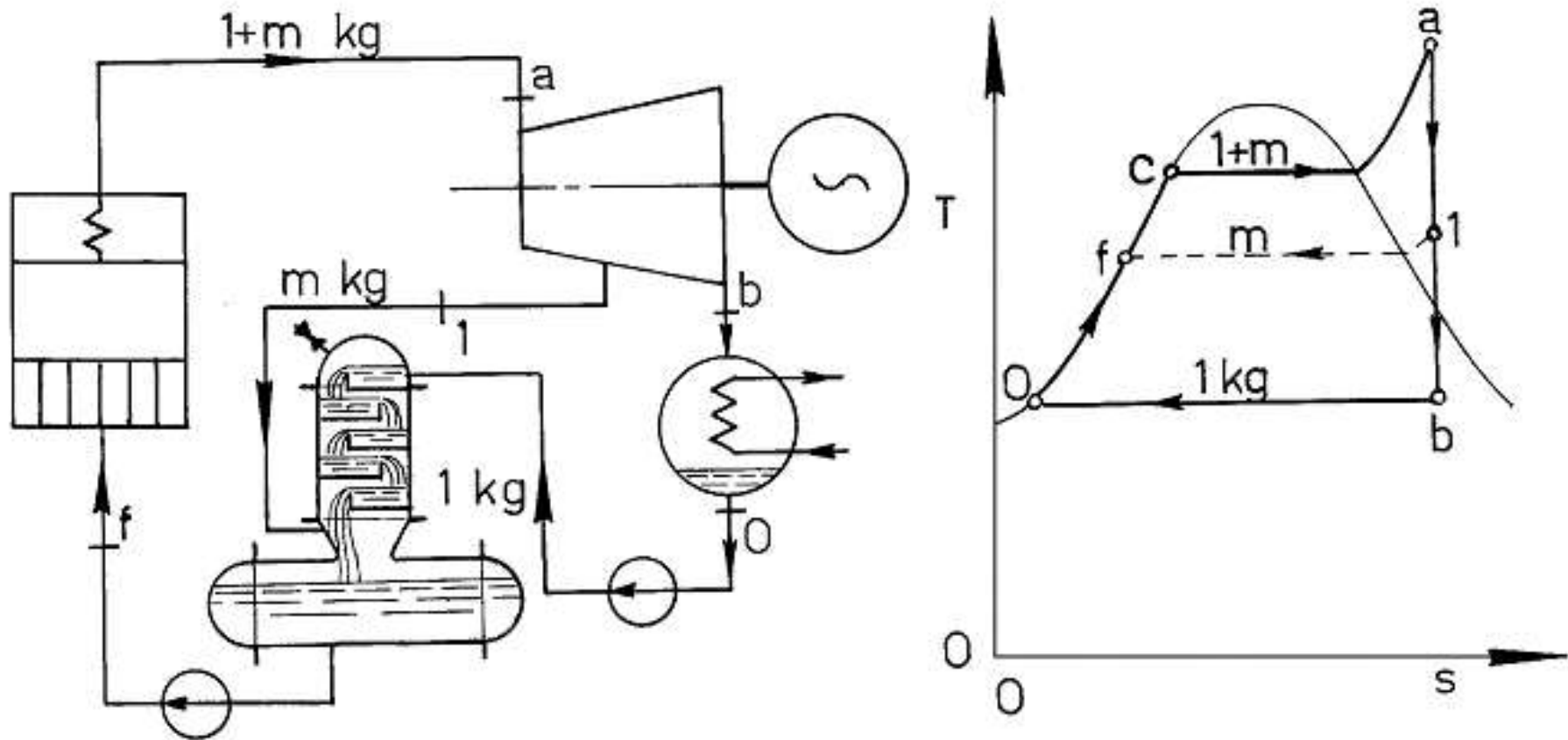
Ciclo RH - SH - RIGENERATIVO



Layout impianto a vapore surriscaldato con risurriscaldamento e rigenerazione $P = 660 \text{ MW}$ $\eta \approx 47\%$

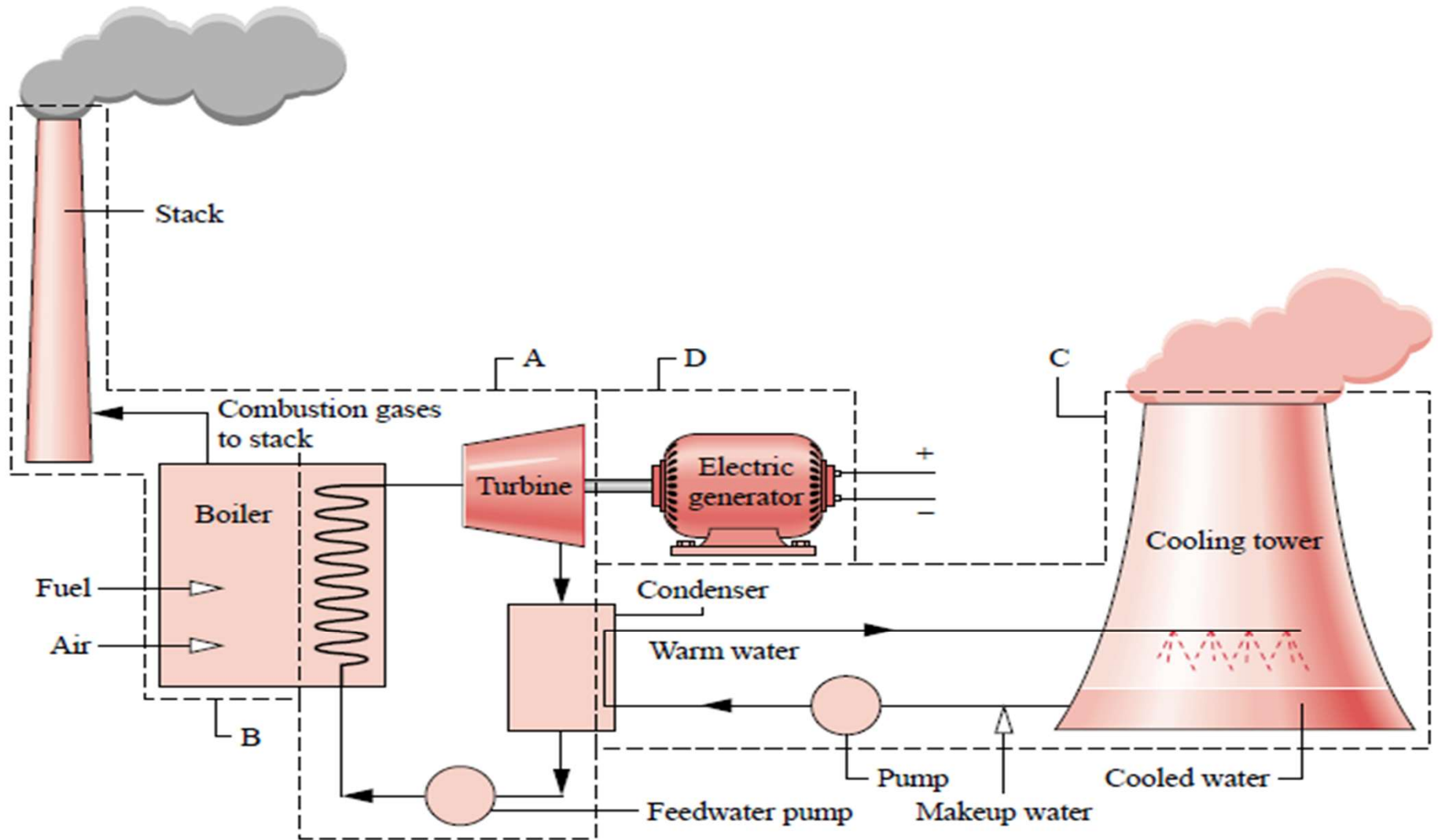


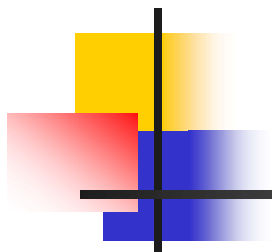
Ciclo RIGENERATIVO (1)



Ciclo a vapore rigenerativo a uno spillamento

Esempio di impianto





Diagrammi termodinamici (1) entropico

Diagramma entropico:

temperatura T - °C

entropia s - kJ/(kg K)

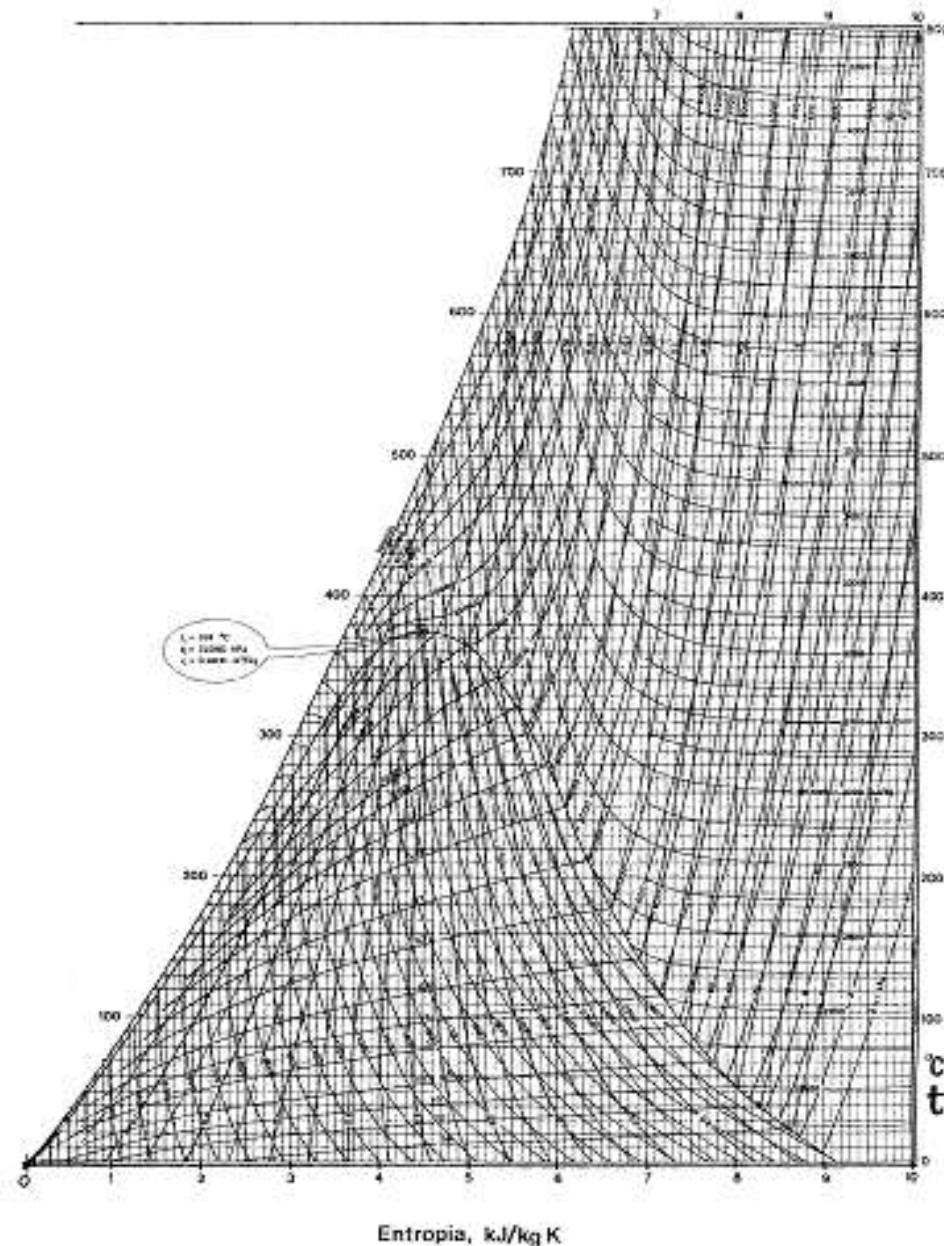
Punto critico (H₂O):

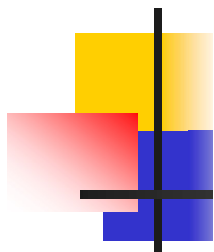
temperatura: $T_{\text{crit.}}$ 374 °C

pressione: $p_{\text{crit.}}$ 22.1 MPa

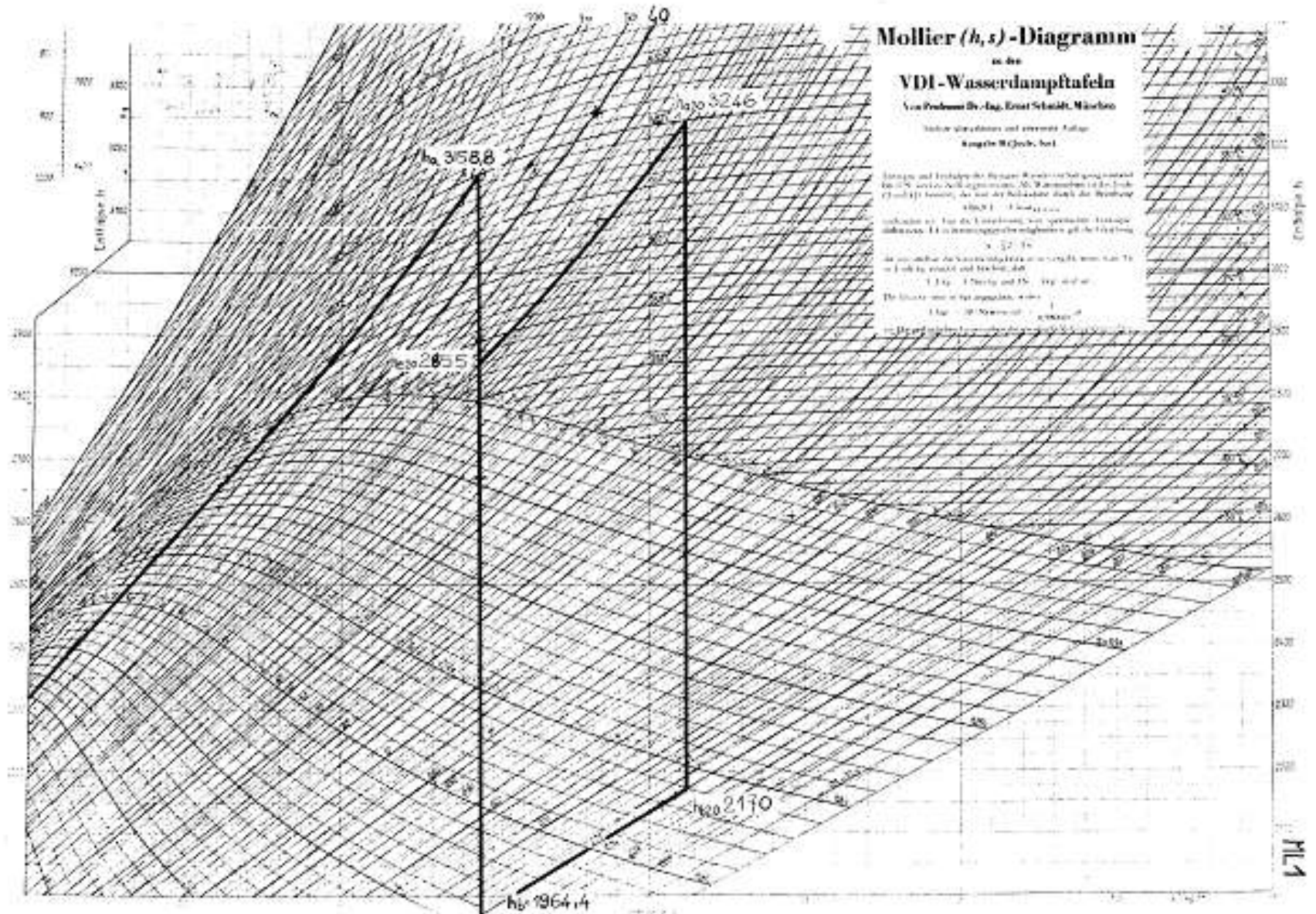
volume massico:

$v_{\text{crit.}}$ 0.0032 m³/kg





Diagrammi termodinamici (2) Mollier



entalpico (*Mollier*): entalpia h - kJ/kg , entropia s - kJ/(kg K)



Fattori che influenzano il rendimento

- Temperatura massima del ciclo
- Pressione massima del ciclo
- Pressione minima del ciclo
- Numero di rigeneratori
- Numero di SH+RH

Rendimento delle centrali

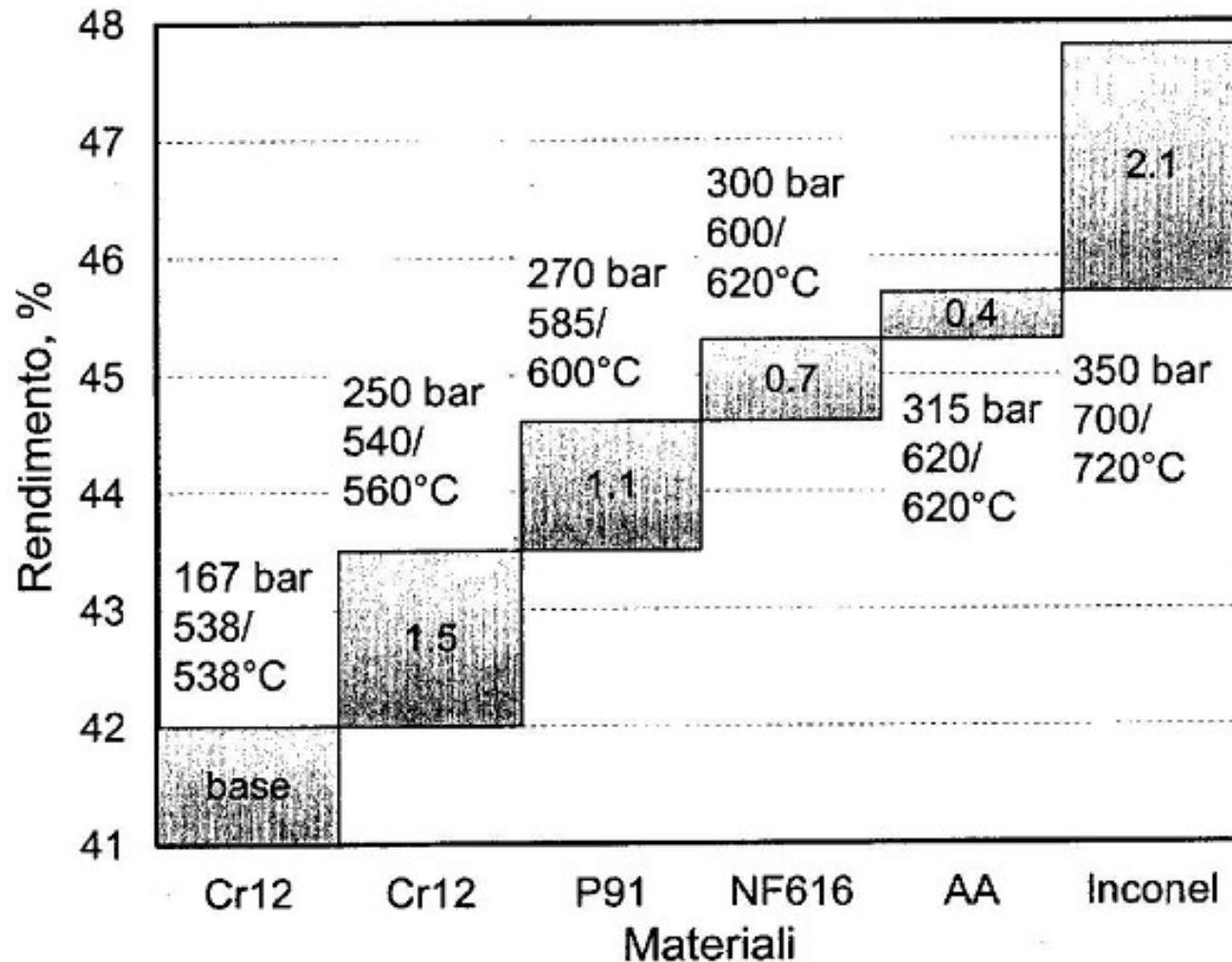


Fig.A4.2: Stima dei miglioramenti di rendimento conseguibili con diverse combinazioni di temperatura e pressione massima per cicli a singolo RH, in relazione ai materiali utilizzati.

[Lozza]



Numero di rigeneratori

Tab.A4.1: Valori indicativi dei parametri adottati nelle centrali a vapore.

	Tecnologia convenzionale	Miglior tecnologia attuale	Obiettivi di R&S
Temperatura massima, °C	535-565	590-620	700-720
Pressione massima, bar	170-250	250-320	350-375
Numero di SH+RH	1+1	1+1 o 1+2	1+1 o 1+2
Numero rigeneratori	6-8	8-10	10
Temperatura acqua alimento, °C	270-280	300-310	320-340
Rendimento netto (LHV), %	40-42	44-46	48-50

[Lozza]

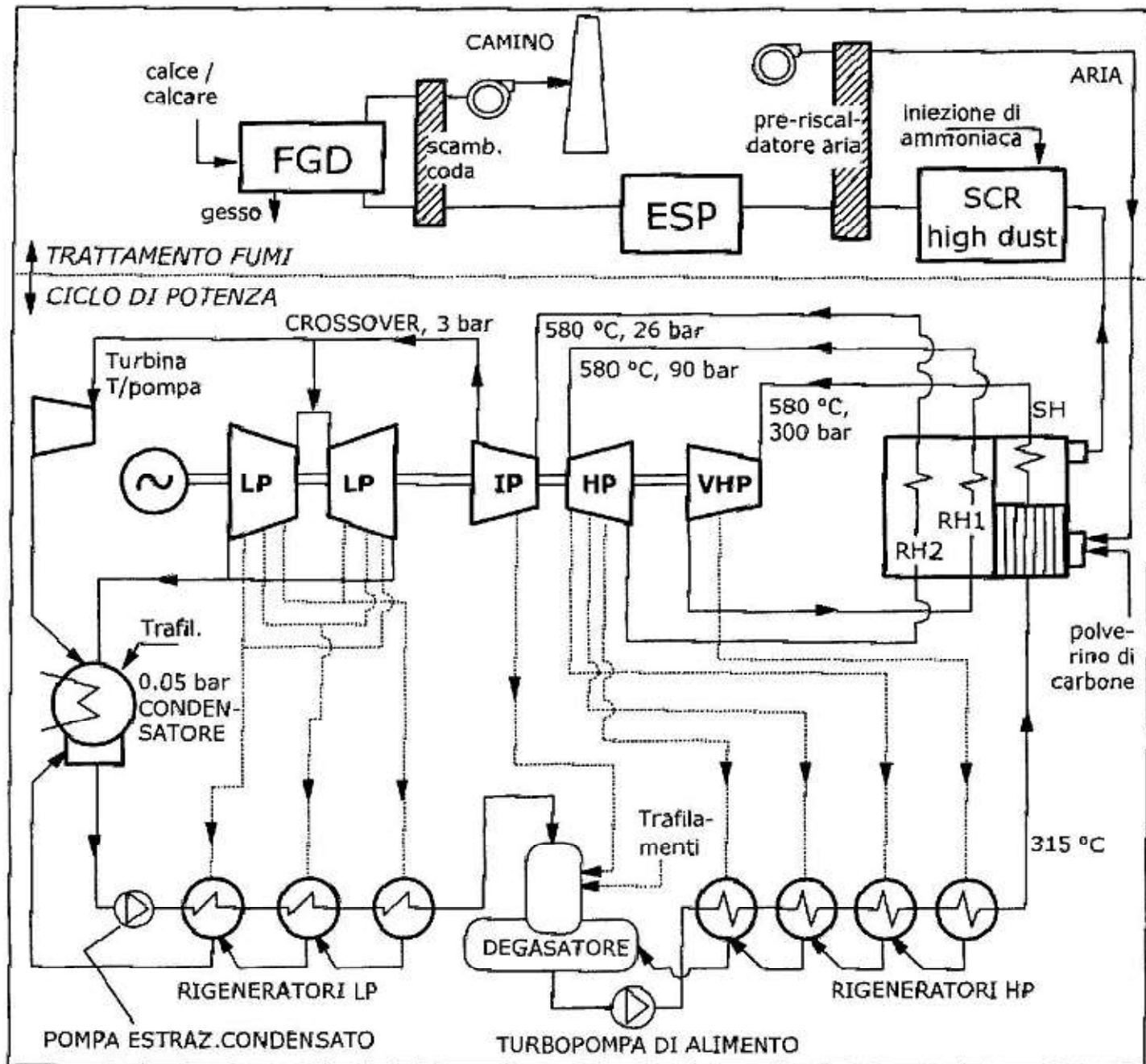
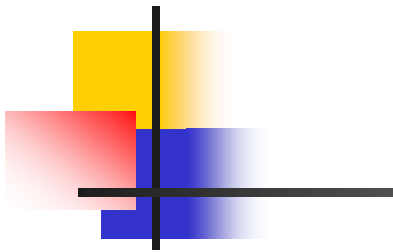


Fig.A4.3: Configurazione impiantistica di una centrale a vapore.

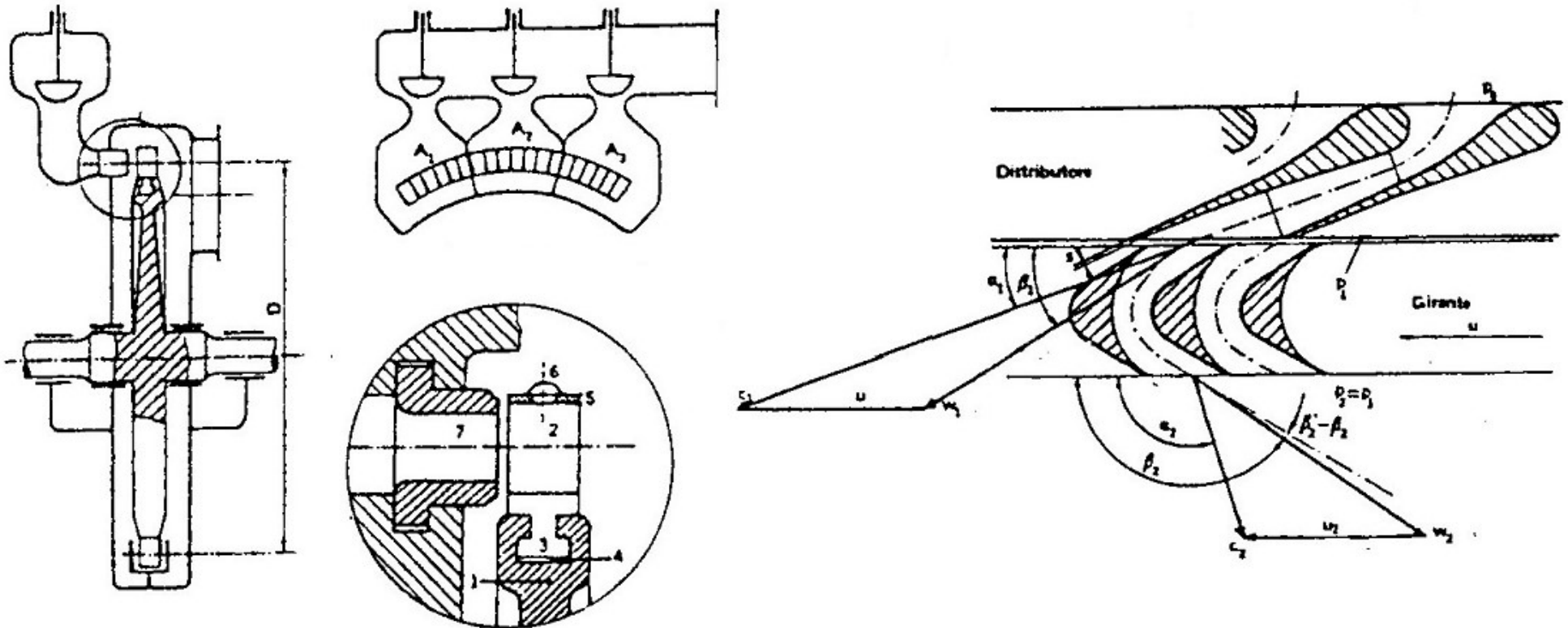
[Lozza]



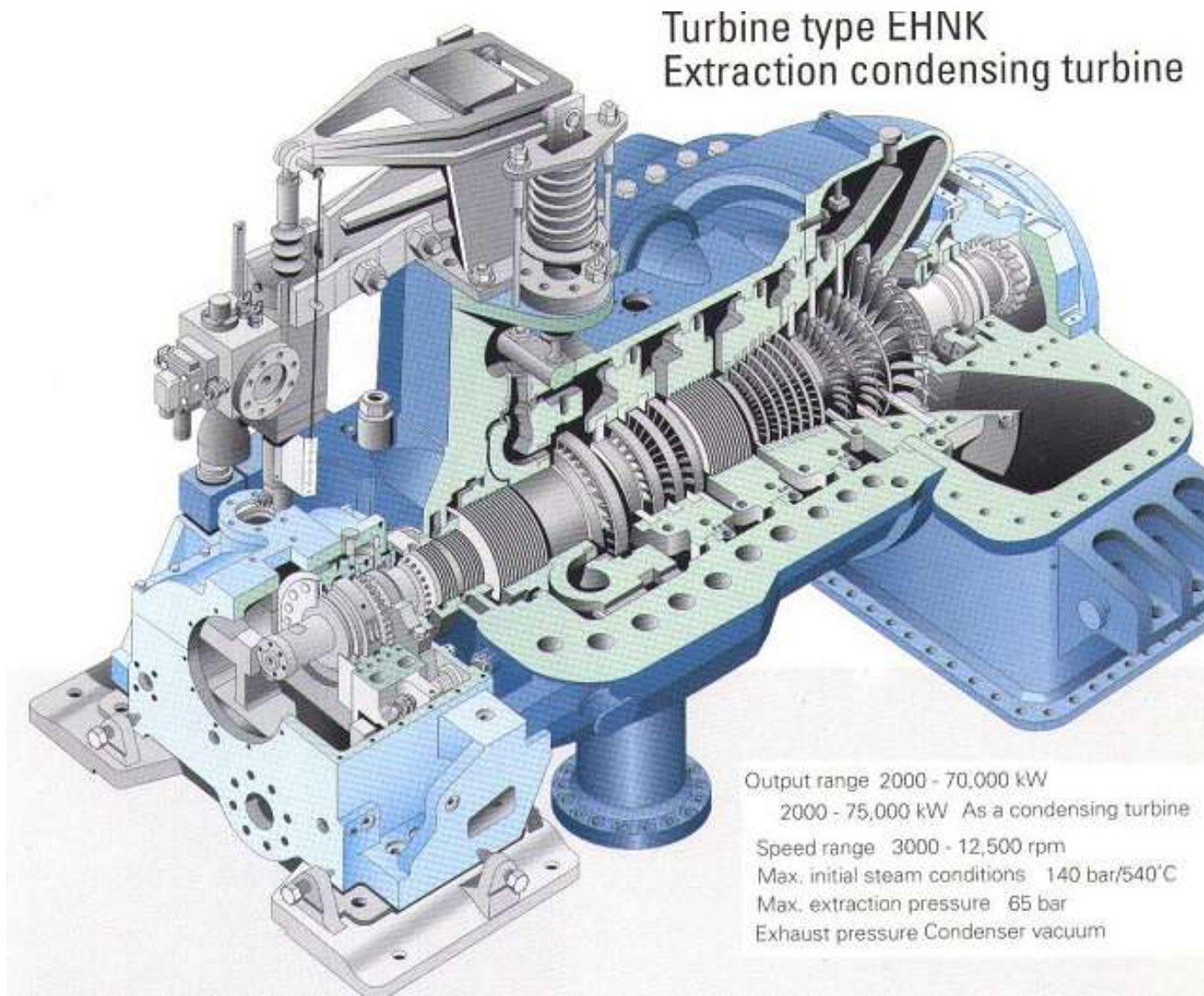
Altri sottosistemi non evidenziati nello schema

- Sistema di circolazione dell'acqua di raffreddamento
- Trattamento del carbone (trasporto, macinazione...)
- Impianto di demineralizzazione dell'acqua di reintegro
- Trattamento dei reagenti e degli effluenti dei sistemi di disinquinamento
-

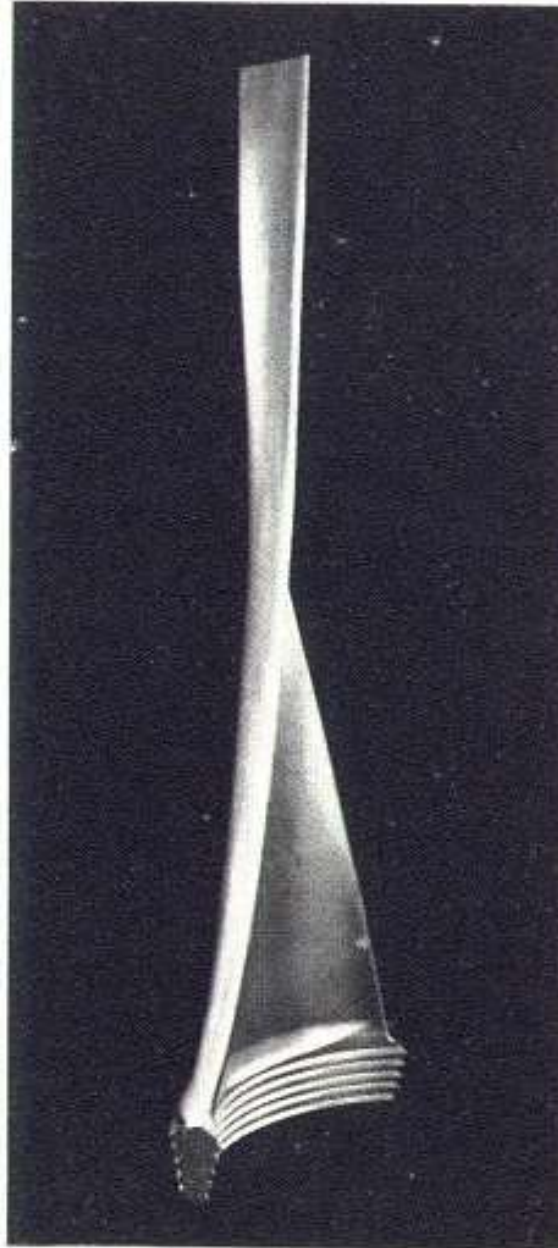
Turbina De Laval



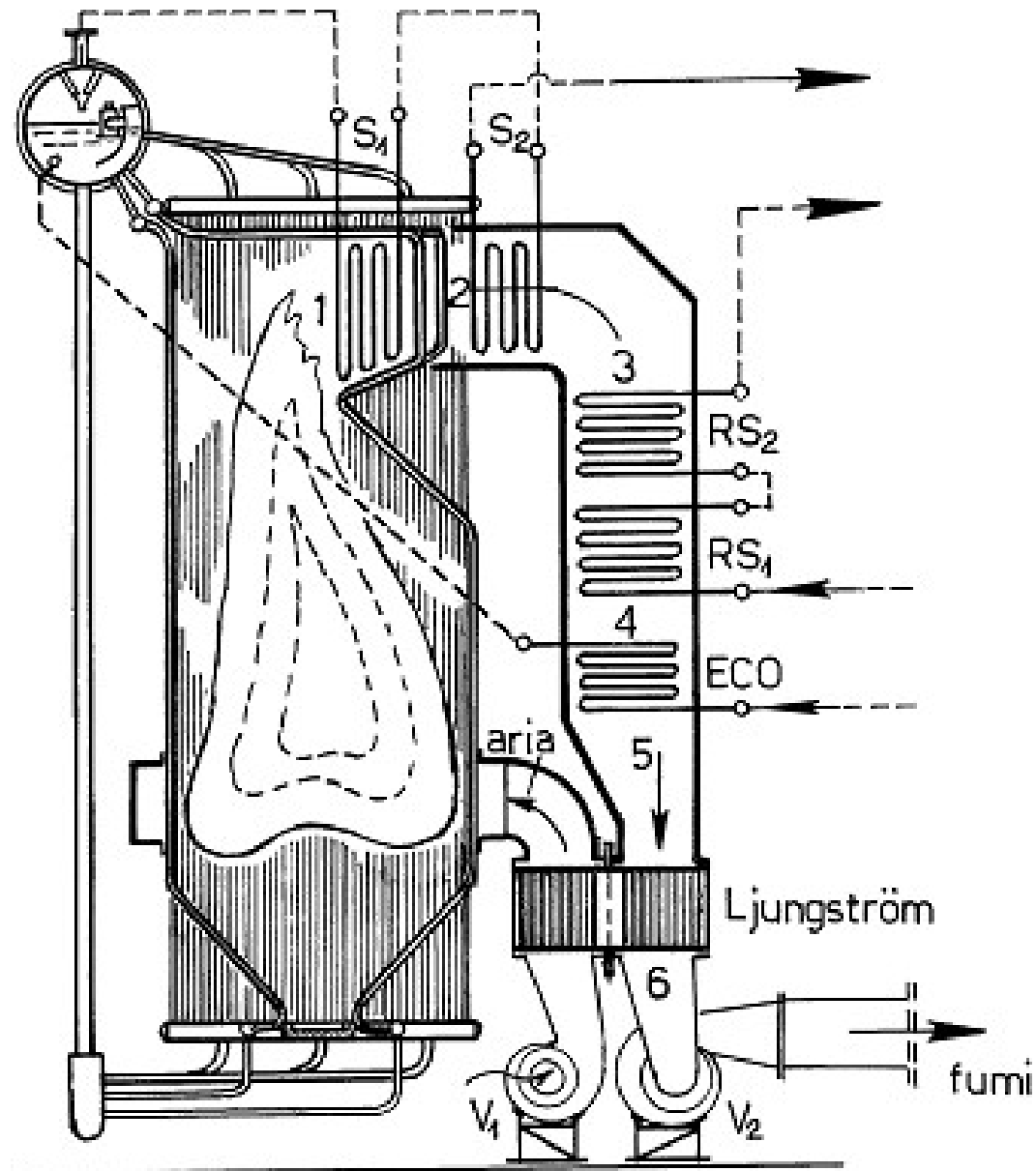
Turbine a vapore



Pala stadio bassa pressione



Generatori di vapore





Rendimento del GV

- Viene espresso come il rapporto tra la potenza termica effettivamente trasmessa al fluido da riscaldare e la potenza termica del combustibile (Portata per potere calorico LHV)
- Perdite
 1. Incompleto recupero termico dei gas combusti
 2. Imperfetto isolamento termico delle pareti
 3. Per rilascio di incombusti
 4. Per rilascio di altre sostanze ad alta temperatura (ceneri)

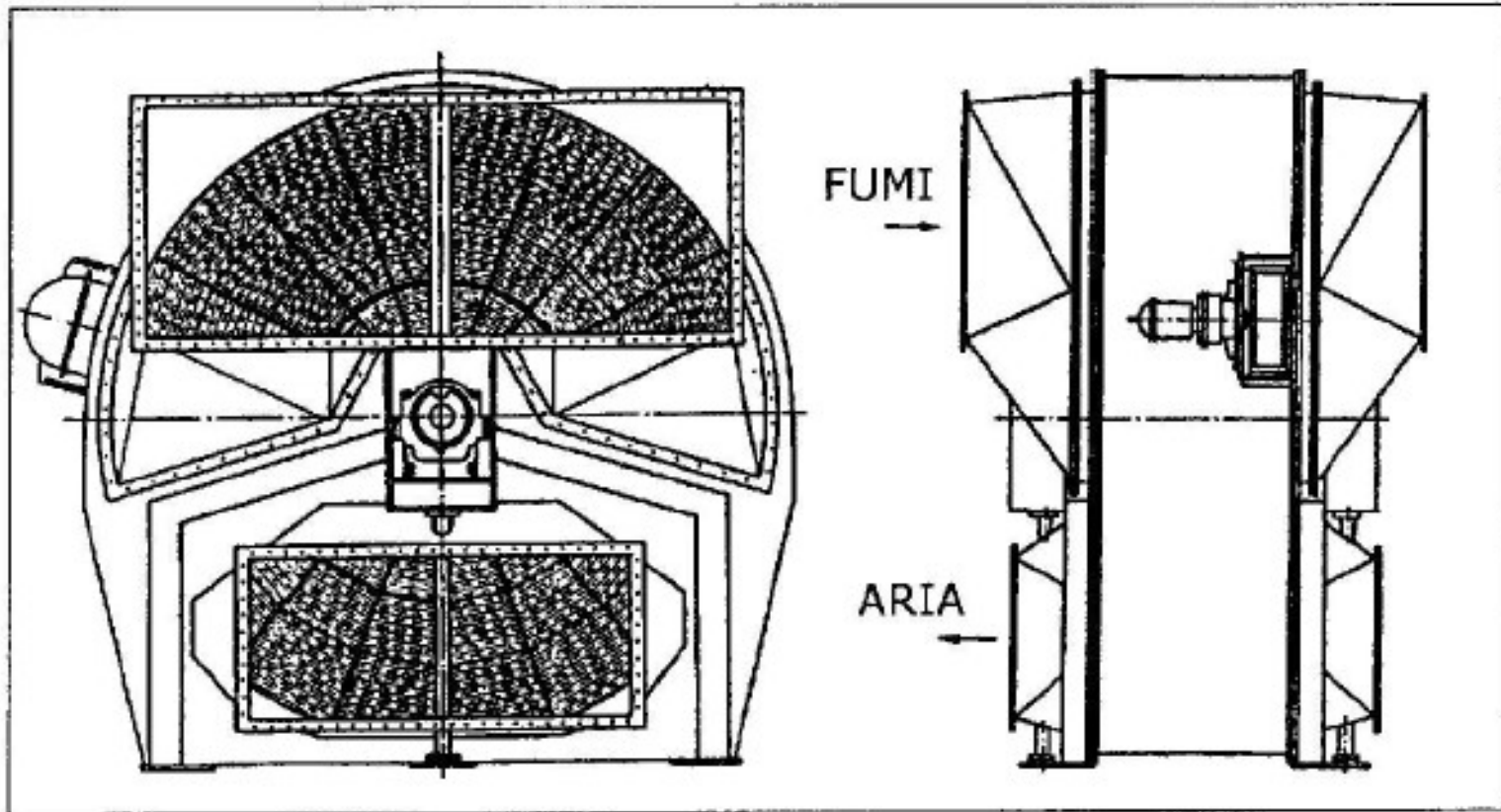


Rendimento del GV

$$\eta_{GV} = 1 - \xi - \frac{G_g \cdot cp_g \cdot (T_s - T_a)}{G_f \cdot LHV} = 1 - \xi - (\alpha + 1) \cdot \frac{cp_g \cdot (T_s - T_a)}{LHV}$$

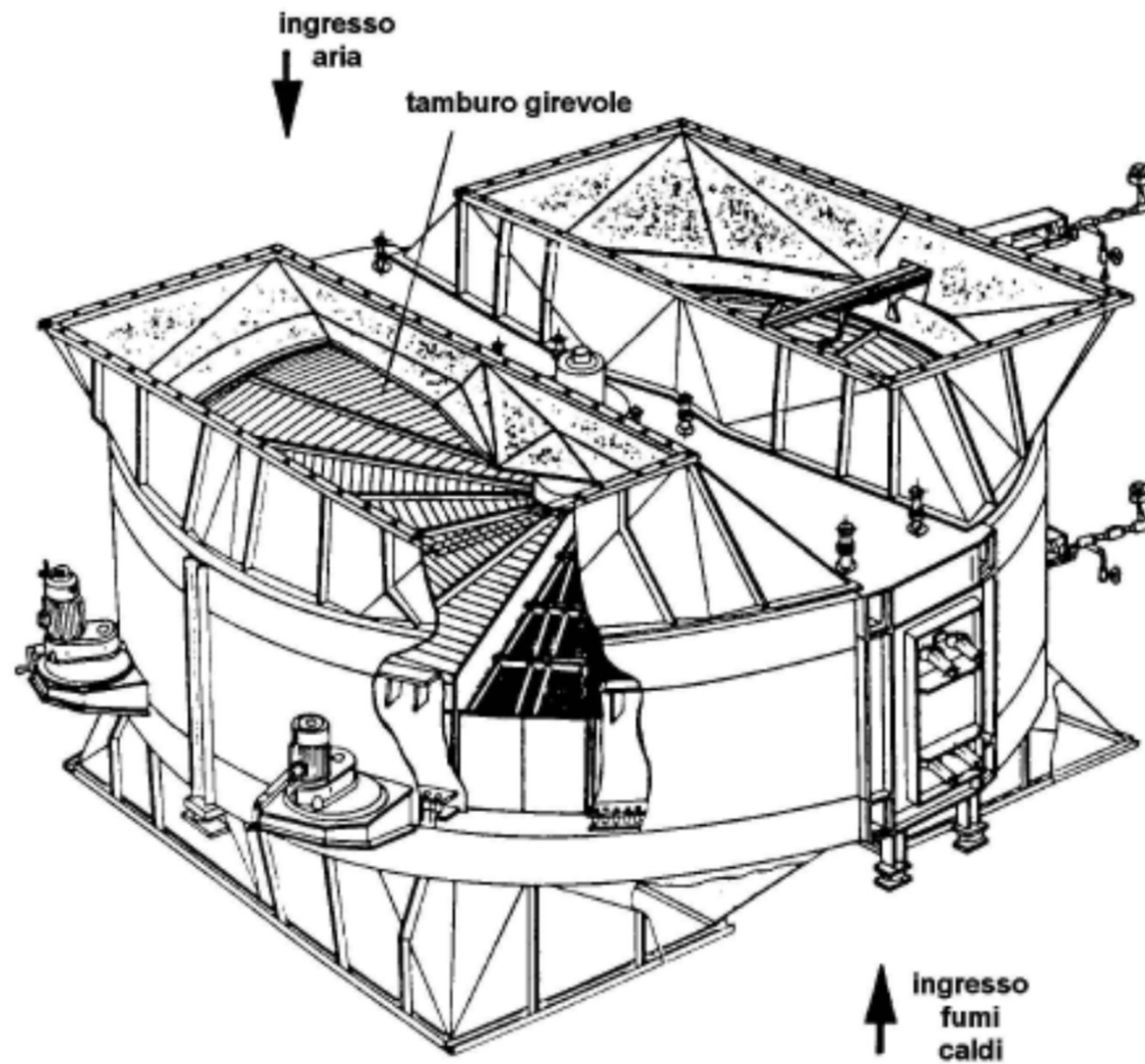
- G_g portata gas
 - G_f Portata combustibile
 - T_s gas camino
 - T_a ambiente
 - ξ somma perdite 2-4
 - α rapporto massico tra aria e combustibile
- Si raggiungono valori del 95%

Scambiatore rigenerativo



[Lozza]

Scambiatore rigenerativo





Condensatore

Per lo smaltimento del calore diverse alternative

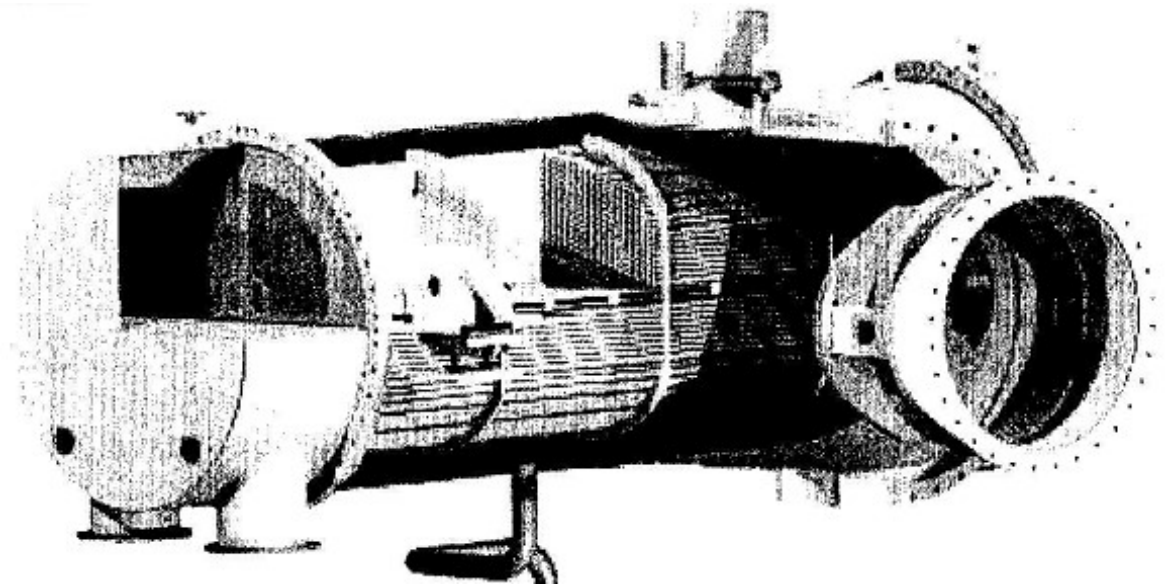
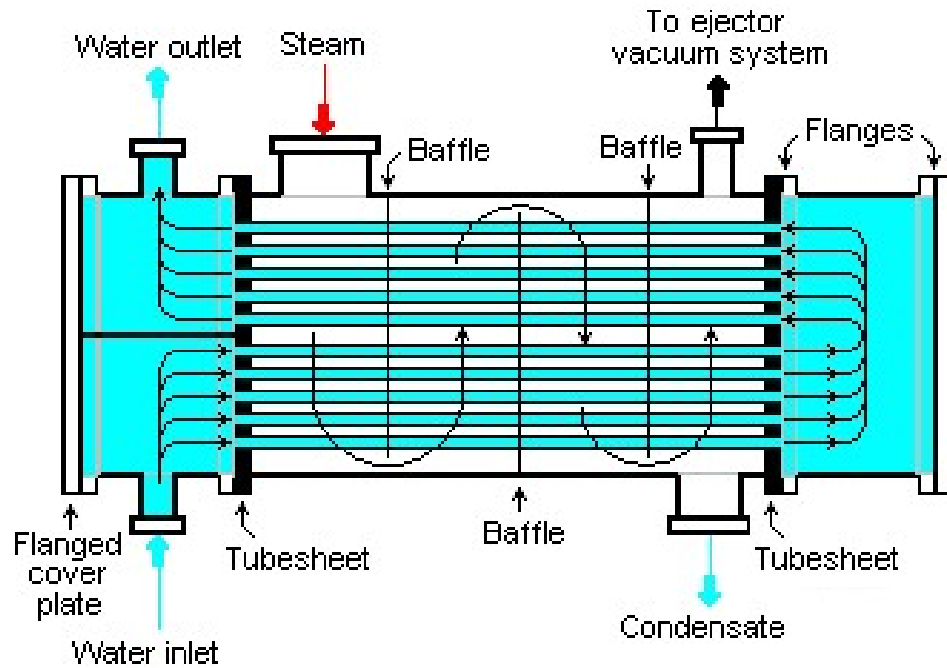
- Acqua di fiume o di mare
- Corrente di acqua refrigerata a contatto con un flusso di aria ambiente
- Aria ambiente



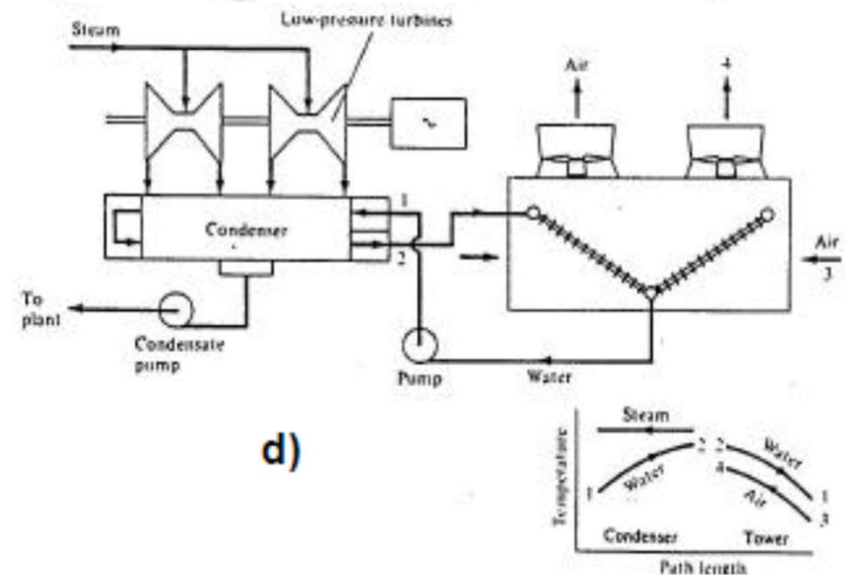
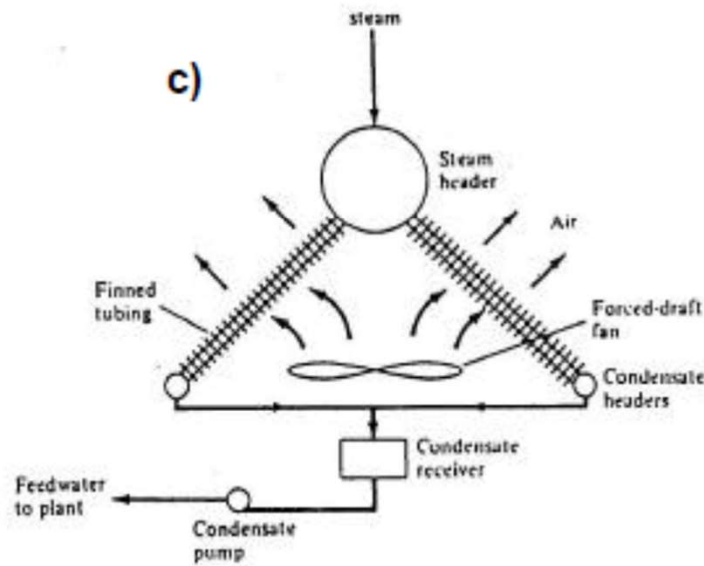
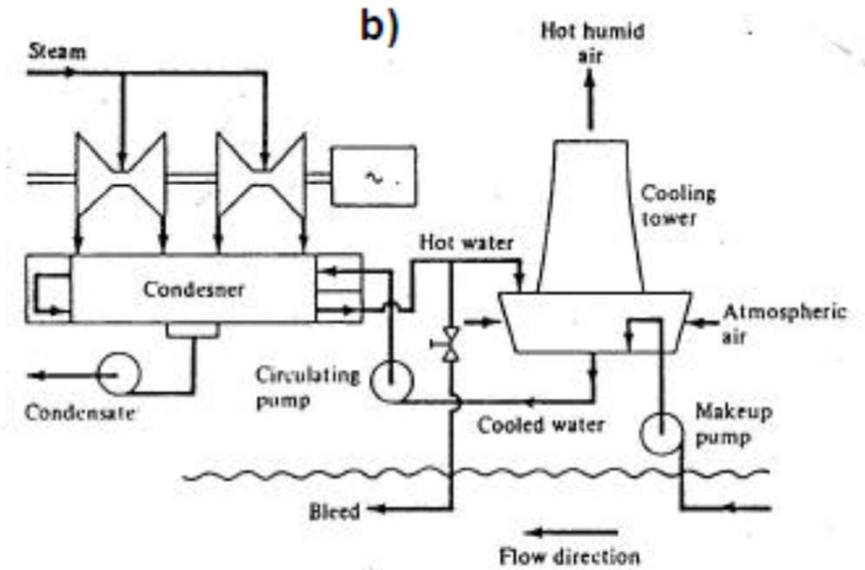
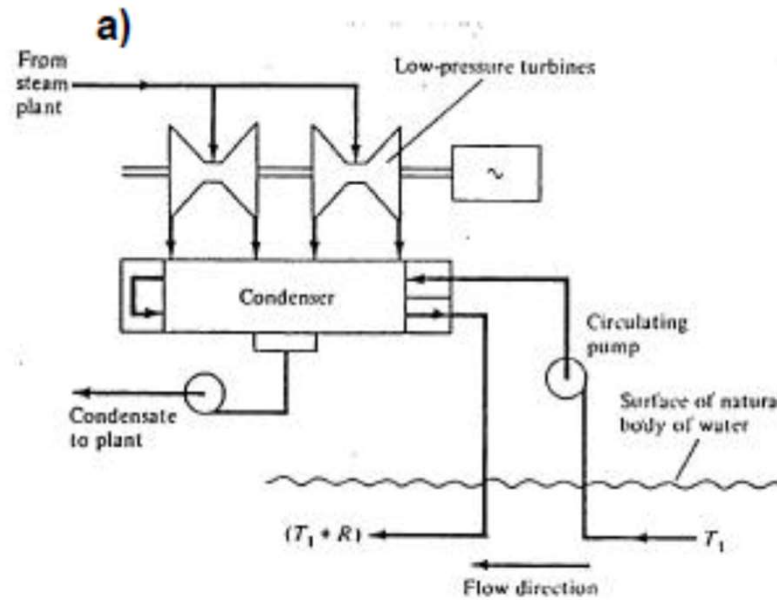
Dispositivi utilizzati

- Scambiatori acqua vapore
- Torri evaporative
- Scambiatori aria/vapore

Condensatori a fascio tubiero



Raffreddamento



Torri evaporative

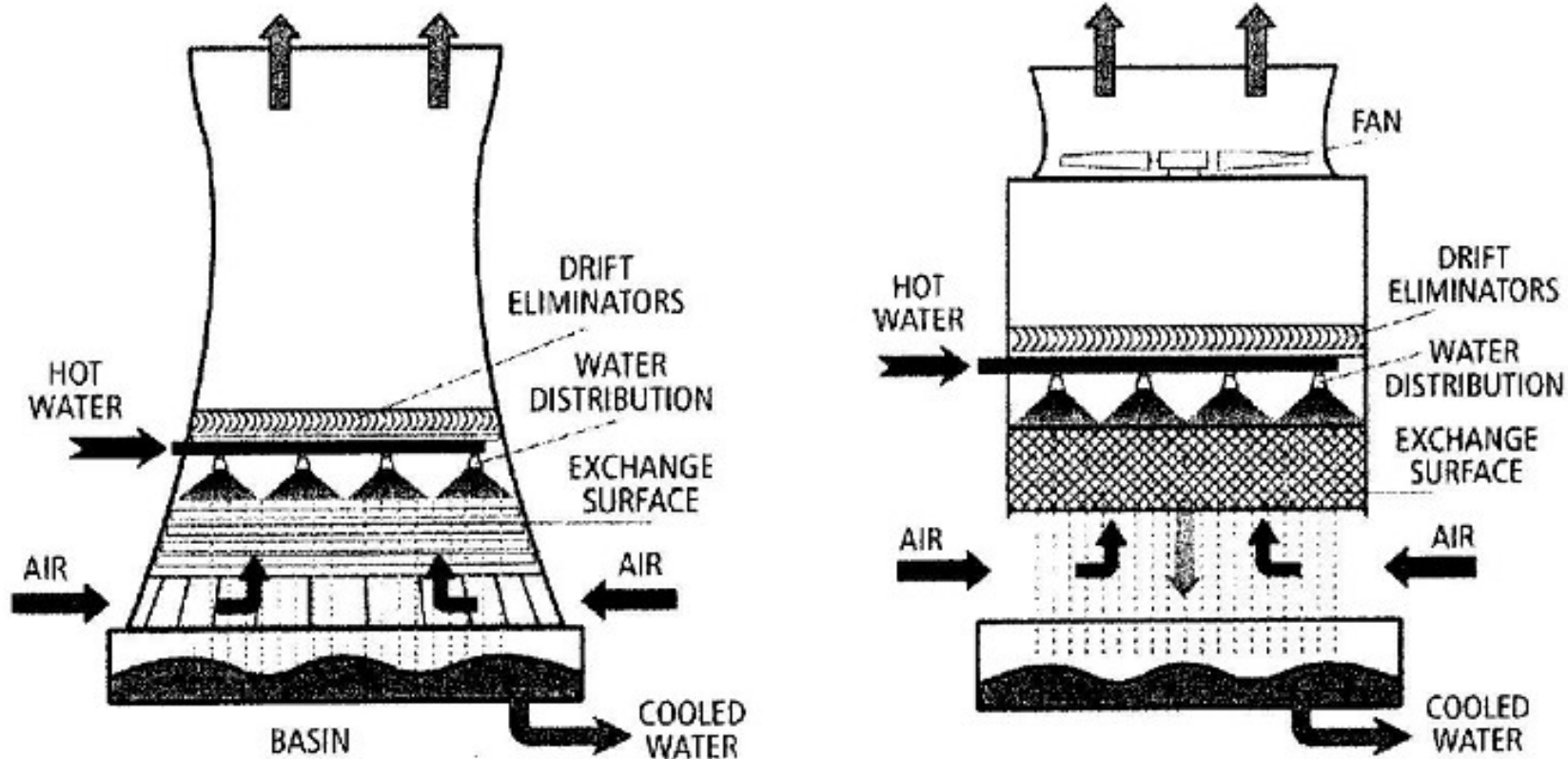


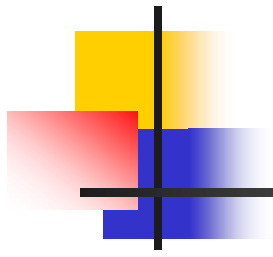
Fig.A4.12: Schemi di torri evaporative. A sinistra una torre a circolazione naturale dell'aria, usata per grandi centrali, a destra una torre a circolazione forzata (induced draft), più diffusa per applicazioni di minore potenza (fonte: Hamon).

Visita tecnica centrale Monfalcone

Venerdì 24 marzo 2023.
Appuntamento alle 8.45 al
parcheggio della centrale

Pranzo in mensa alla centrale
Ore 1315 visita impianto TG
Cartiera duino





RIMOZIONE DEGLI INQUINANTI

Reburning

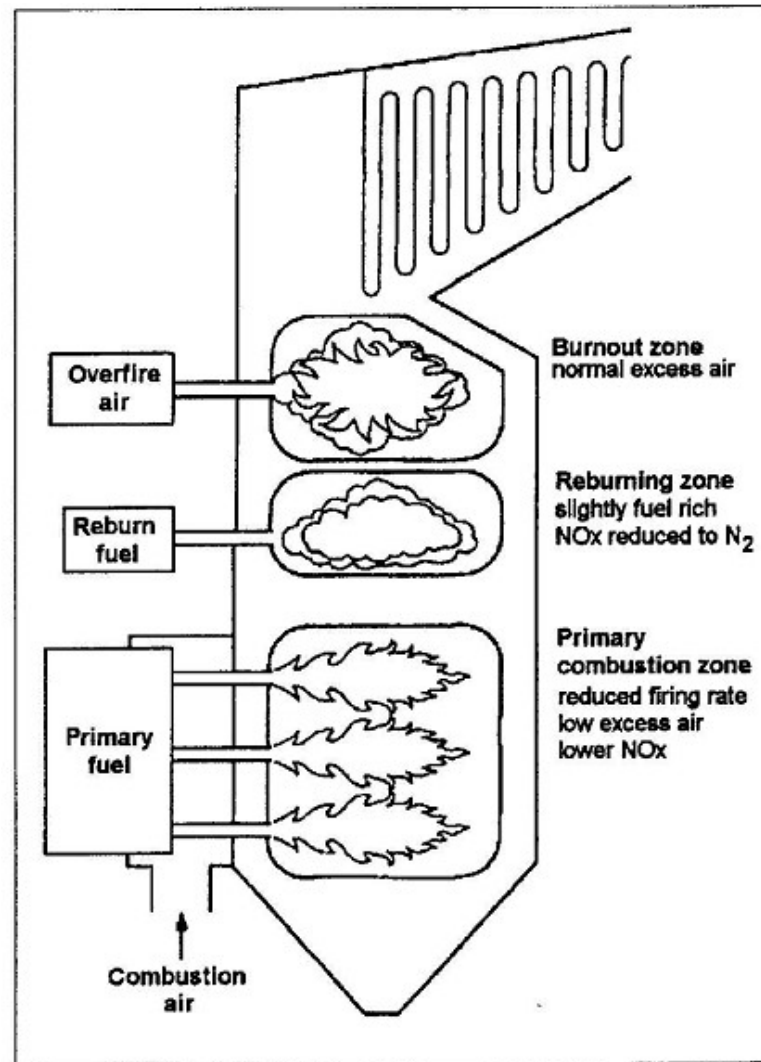


Fig.A4.13: Schema di "reburning".

[Lozza]

Bruciatori a basso NOx

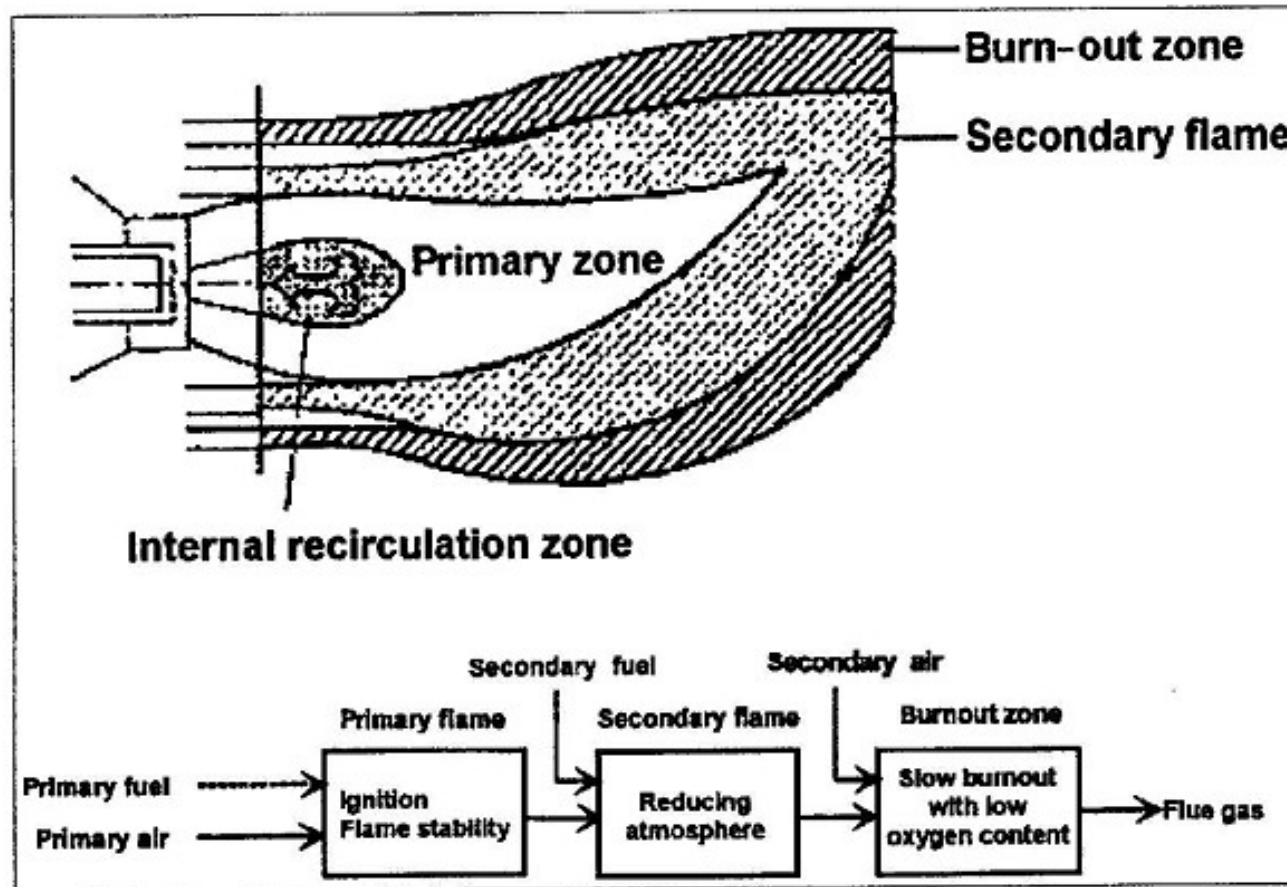


Fig.A4.14: Schema concettuale di bruciatore a bassa emissione di NOx.

[Lozza]

Rimozione NOx

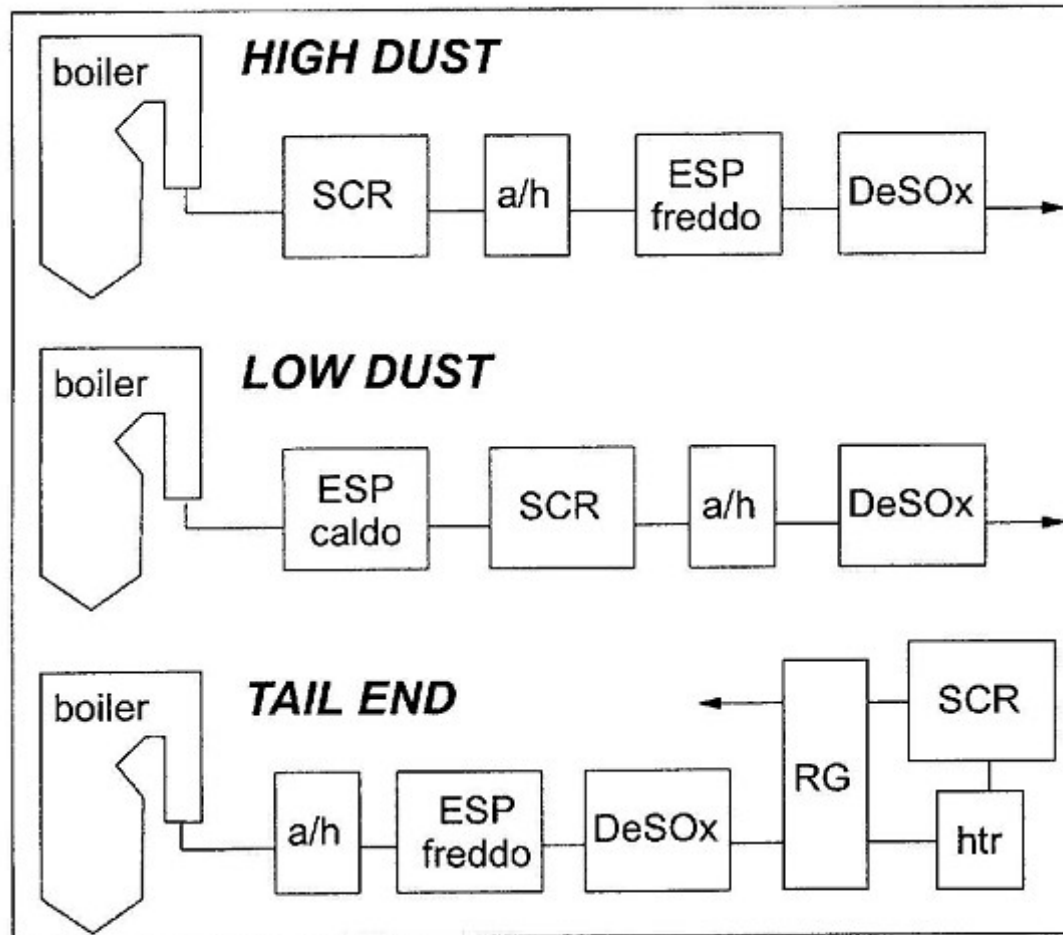


Fig.A4.15: Possibili configurazioni di inserimento di un SCR a valle di un generatore di vapore (boiler). Legenda: a/h: riscaldatore aria comburente; ESP: precipitatore elettrostatico; DeSOx: desolforatore; RG: scambiatore rigenerativo; htr: post-riscaldatore con combustione di gas naturale.

Wet Scrubbers

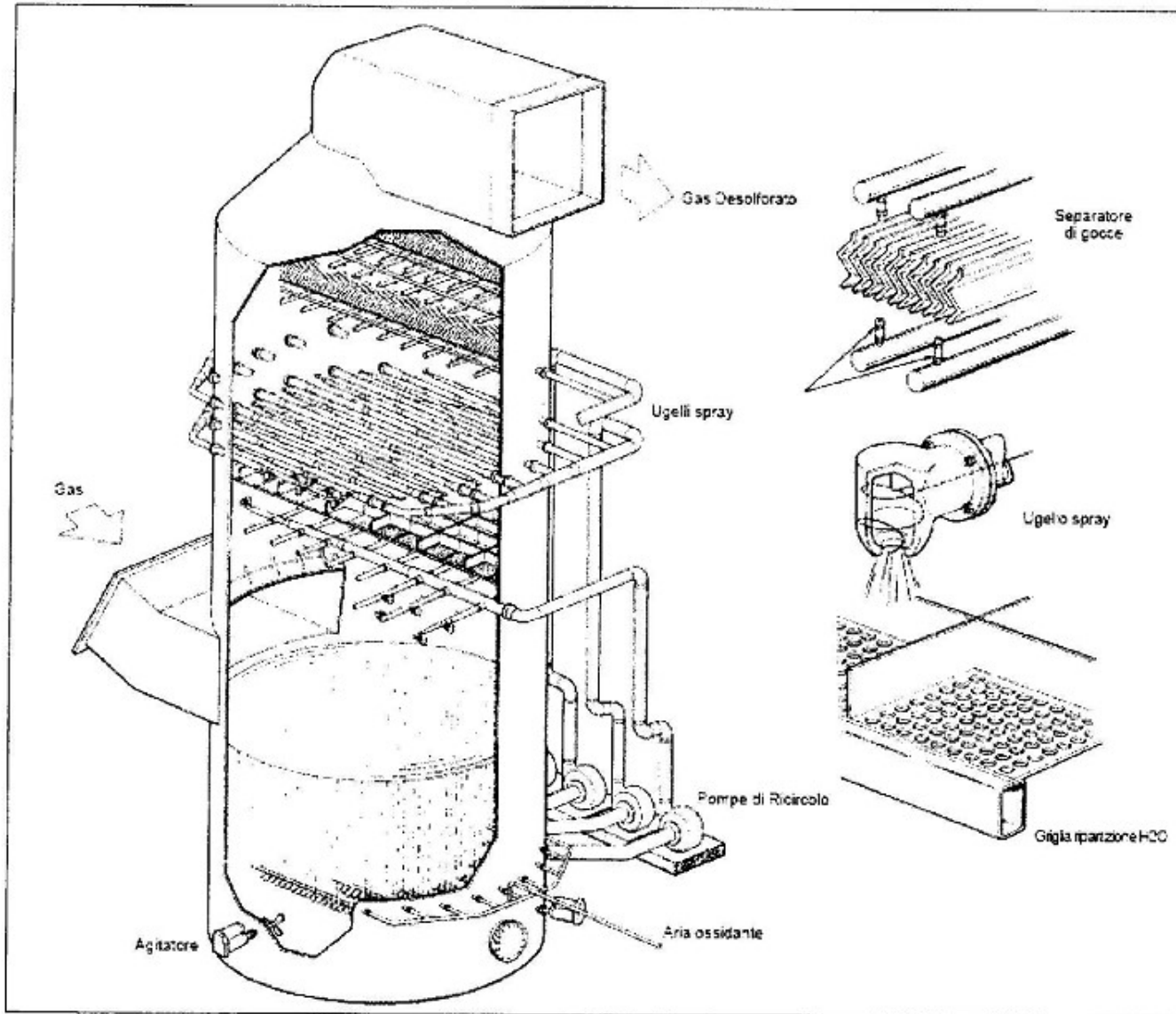


Fig.A4.16: Schema di un sistema 'wet scrubber'.

Fabric Filters

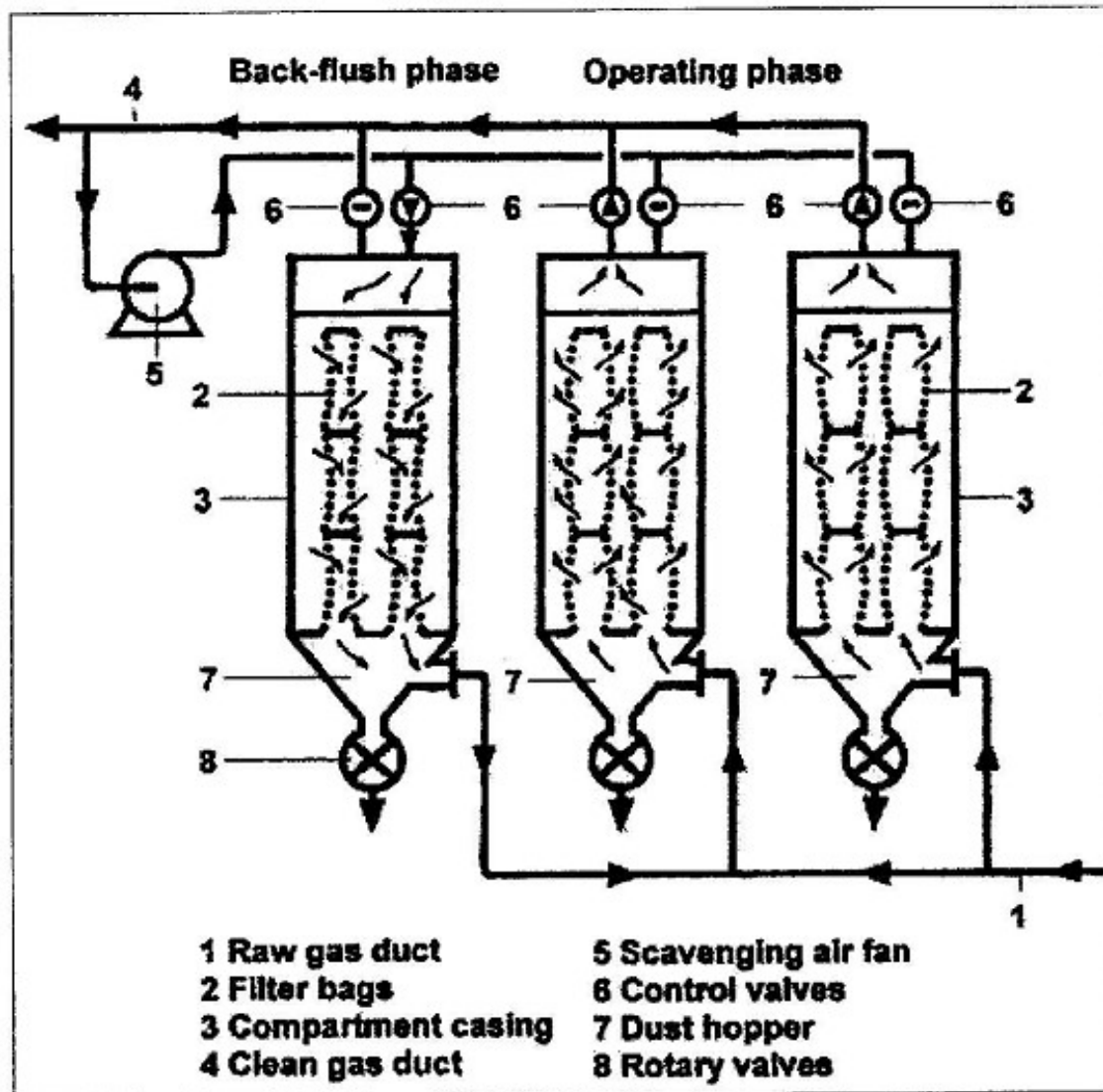


Fig.A4.17: *Principio di funzionamento di 'fabric filters'.*