

# *Energetica Nucleare*

## *Classificazione delle Fonti Energetiche*



*Prof. Ing. Guglielmo Lomonaco*

email: [guglielmo.lomonaco@unige.it](mailto:guglielmo.lomonaco@unige.it)

Tel: +39-010-3352867

# Energia e lavoro [1/2]

- *Energia* è una parola che esisteva già nella lingua greca antica (εν εργον) e che in inglese (energy) compare nel 17° secolo
- L'energia è una grandezza fisica che interviene nella realizzazione di processi fisici, chimici, biologici e tecnologici
- Il *lavoro* compiuto da una forza, quando il punto d'applicazione di questa effettua uno spostamento, è dato dalla forza moltiplicata per la componente dello spostamento nella direzione della forza stessa

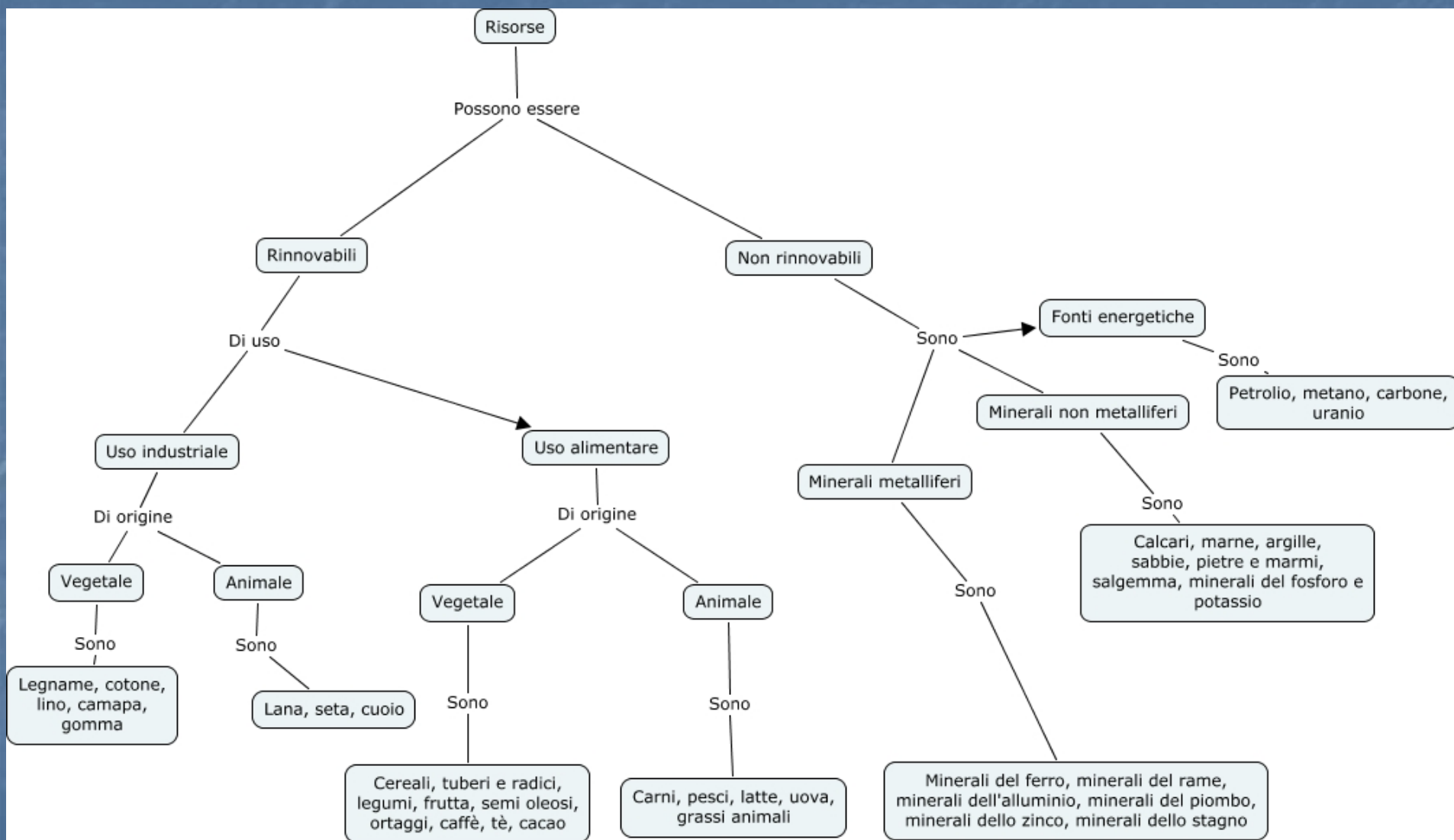
# Energia e lavoro [2/2]

- L'*energia*, che può trasformarsi in lavoro, ha le dimensioni di quest'ultimo, ossia quelle di una forza per uno spostamento (come si ottiene immediatamente facendo riferimento all'energia potenziale), ma anche quelle di una massa per il quadrato della velocità (come si ha, in modo diretto, facendo riferimento all'energia cinetica)
- Ne deriva che l'energia per unità di forza (e quindi di peso) ha le dimensioni di una lunghezza e che l'energia per unità di massa ha le dimensioni di una velocità al quadrato

# Commodity

- Lavoro, calore e combustibili sono beni commercializzati: si parla di *energy commodities*
- Una commodity è un bene per il quale ci sia una domanda ma che sia fornito senza differenziazione qualitativa in un dato mercato
- La caratteristica delle commodity è che il loro prezzo è determinato come funzione dell'intero mercato

# Classificazione «classica» materie prime



# CLASSIFICAZIONE DELL'ENERGIA

- Energia meccanica:
  - energia cinetica
  - energia potenziale (gravitazionale)
  - energia elastica
- Energia termica (calore)
- Energia elettrica
- Energia chimica
- Energia nucleare
- ...

# Forme di Energia

## Presenti in natura

- gravitazionale
- cinetica
- termica
- chimica
- elettrica ed elettromagnetica
- nucleare

## Direttamente utilizzate dall'uomo

- termica
- meccanica
- chimica
- elettrica ed elettromagnetica

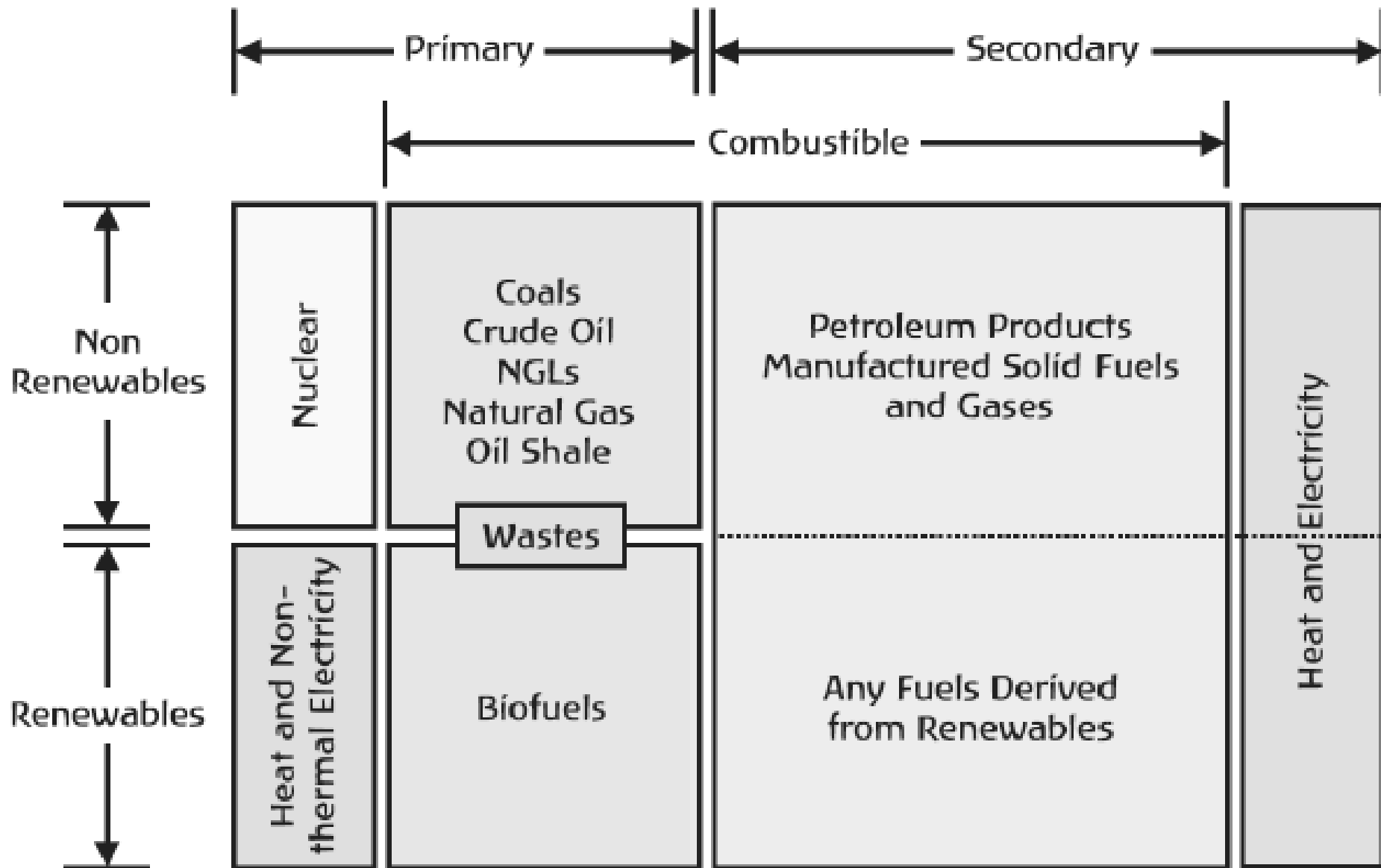
# Fonti Energetiche Naturali Fondamentali

- radiazione solare
- campo gravitazionale (sole, luna, terra)
- formazione del sistema planetario e degli elementi chimici

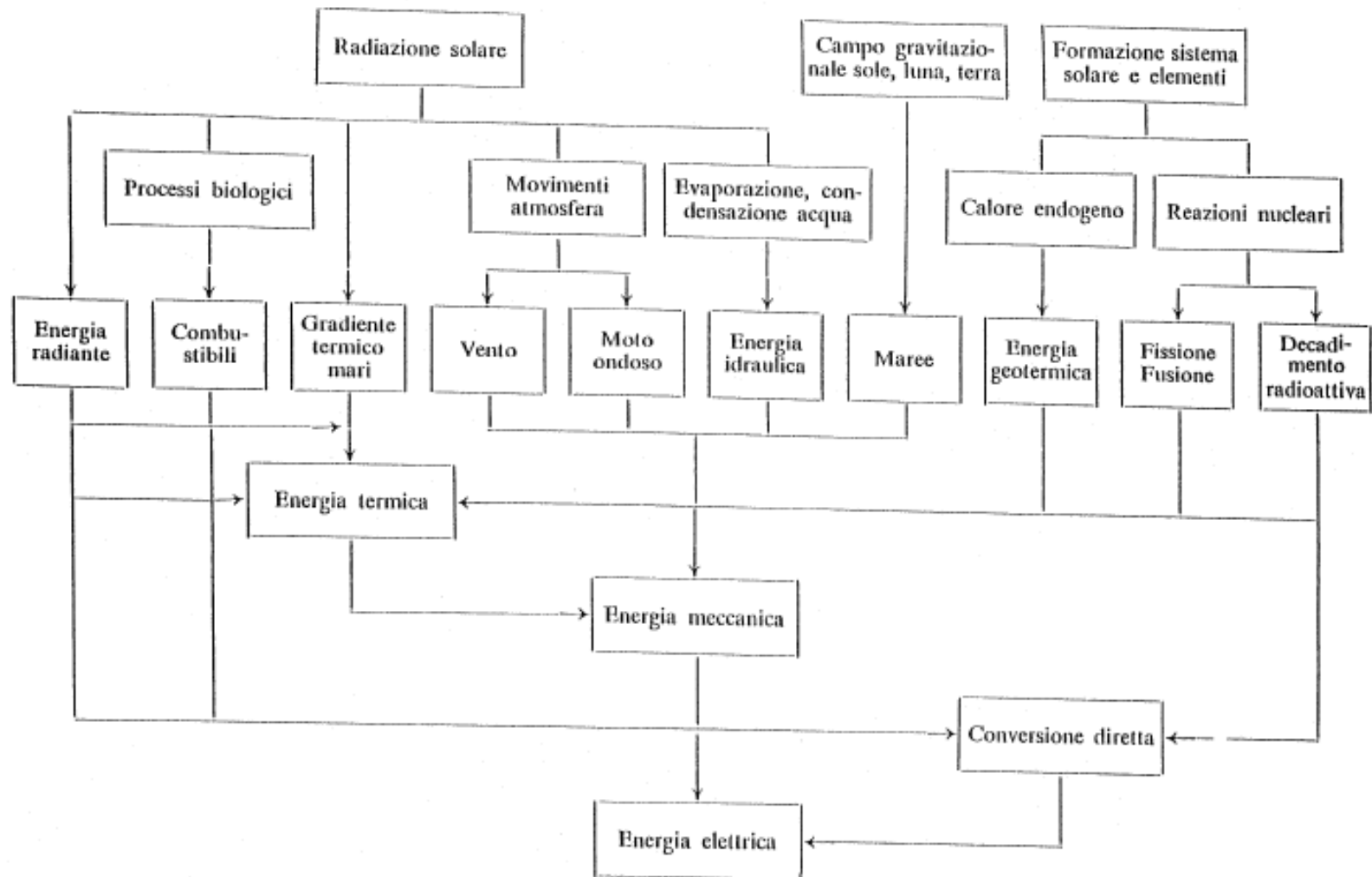
# Fonti Energetiche Naturali Primarie (utilizzabili)

- energia radiante (solare)
- energia chimica dei combustibili
- gradiente termico marino
- energia eolica
- moto ondoso e maree
- energia idraulica
- energia geotermica
- energia nucleare da fissione (e da fusione)
- decadimento radioattivo

# Fonti Primarie e Secondarie



# Trasformazioni dell'Energia



# Conversioni di Energie

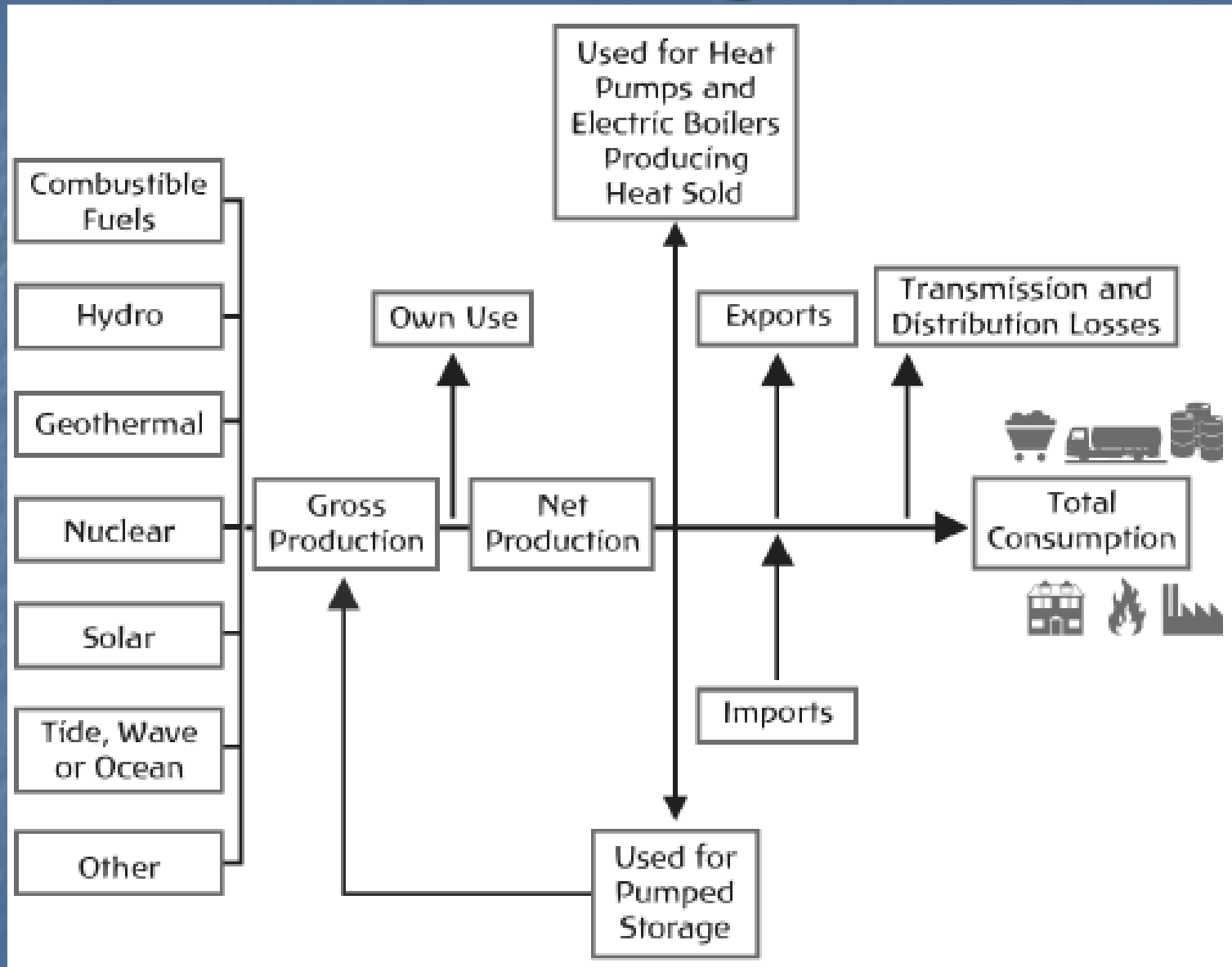
## A ENERGIA

DA ENERGIA	Gravitazionale	Cinetica	Termica	Chimica	Elettrica	Elettromagnetica	Nucleare
Gravitazionale	—	attrazione di masse	sconosciuta	sconosciuta	sconosciuta	sconosciuta	sconosciuta
Cinetica	lancio di masse	—	attrito	dissociazione radiolitica	apparati MHD	accelerazione particelle	sconosciuta
Termica	sconosciuta	efflussi gassosi	—	reazioni endoterme	effetti termoelettrici	radiazioni termiche	sconosciuta
Chimica	sconosciuta	tessuti animali	combustione	—	batterie e celle a combustione	chemiluminescenza	sconosciuta
Elettrica	sconosciuta	motori elettrici	effetti chimici	elettrolisi	—	radiazione elettromagnetica	sconosciuta
Elettromagnetica	sconosciuta	fenomeni fotoelettrici	radiazioni termiche	fenomeni fotochimici	fenomeni fotoelettrici	—	reazioni $\gamma$
Nucleare	sconosciuta	radiazioni $\alpha$	fissione e fusione	catalisi da radiazione	batteria nucleare	reazioni $\gamma$	—

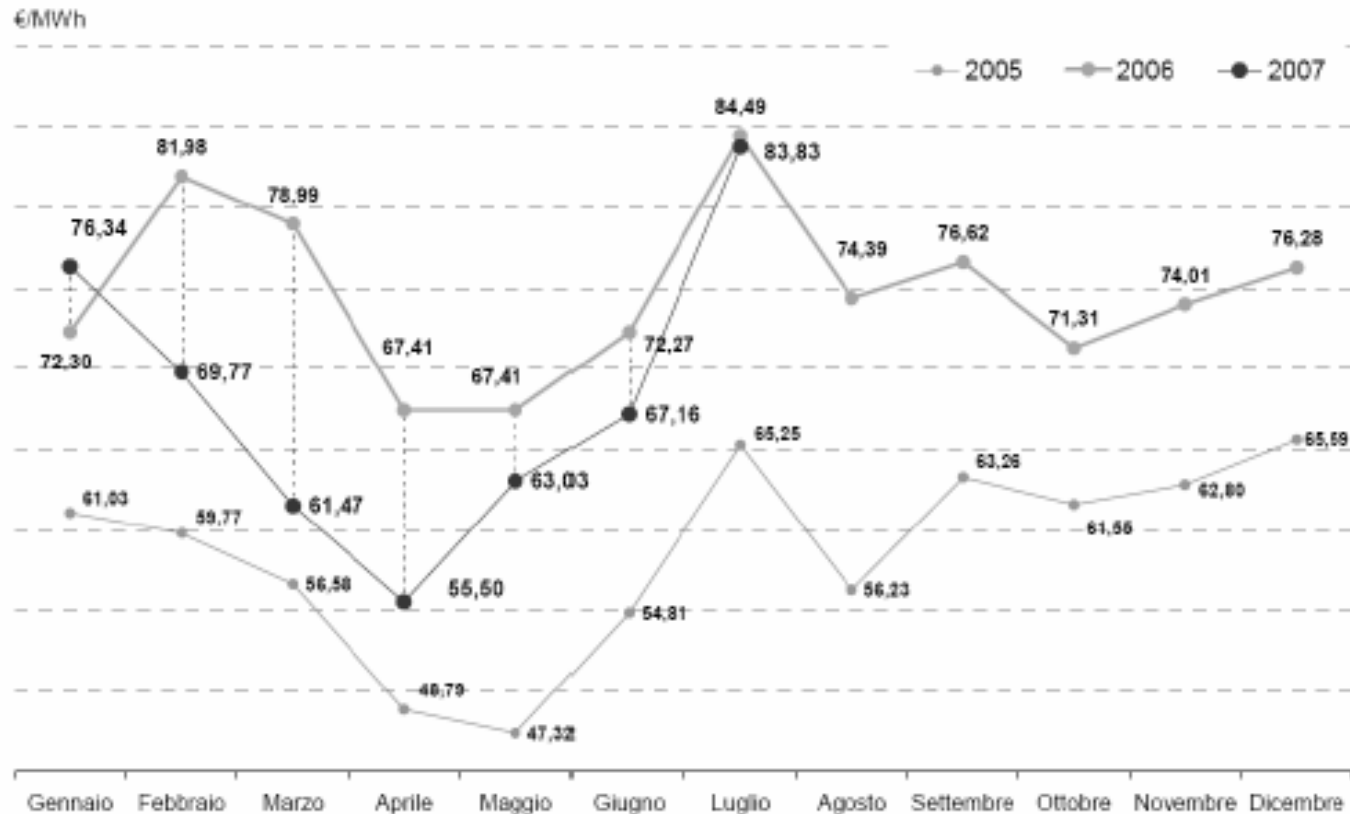
# Energia elettrica

- L'energia elettrica è un vettore energetico con un vastissimo ambito di applicazioni
- È convertibile con basse perdite in energia meccanica
- Si considera:
  - Primaria se ottenuta da energia idraulica, eolica, fotovoltaica, tidale e ondosa
  - Secondaria se ottenuta da calore di origine nucleare, geotermica, solare (termico) e dalla combustione (centrali termoelettriche)

# «Ciclo» dell'energia elettrica



# Mercato dell'energia elettrica (Italia) andamento mensile



# Mercato dell'energia elettrica (Italia) esempio giornaliero



## Mercato del giorno prima

lunedì 08 ottobre 2007

### Prezzo di Acquisto

€/MWh

Media giornaliera  
Media ore di picco  
Media ore fuori picco  
Minimo  
Massimo

63,46  
84,23  
42,68  
23,59  
103,46

### Quantità

MWh

in borsa

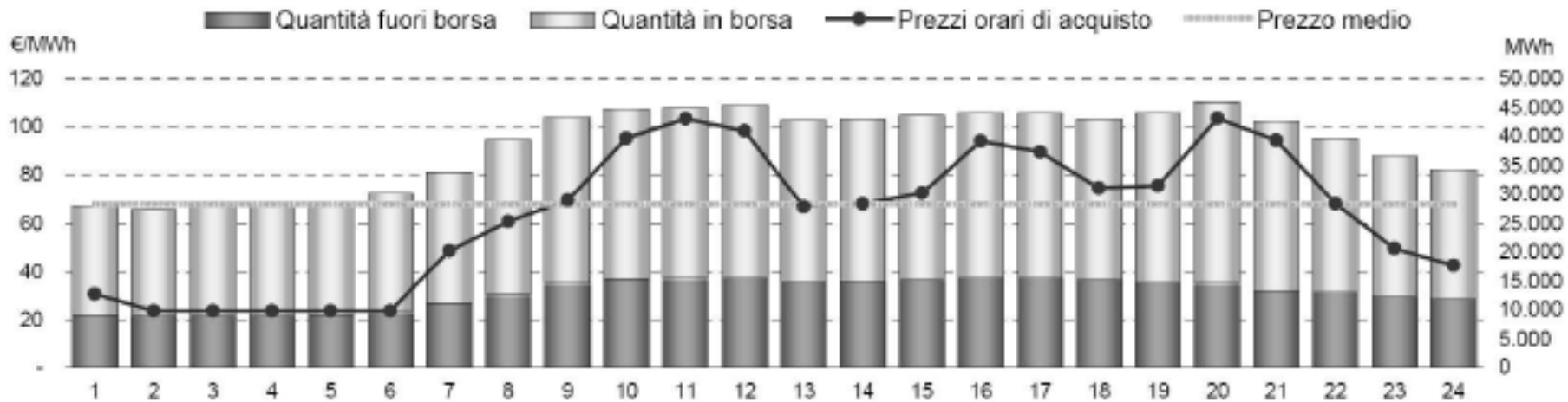
Totali

25.691	38.578
29.003	44.070
22.379	33.086
18.311	27.300
31.391	45.946

### Liquidità

%

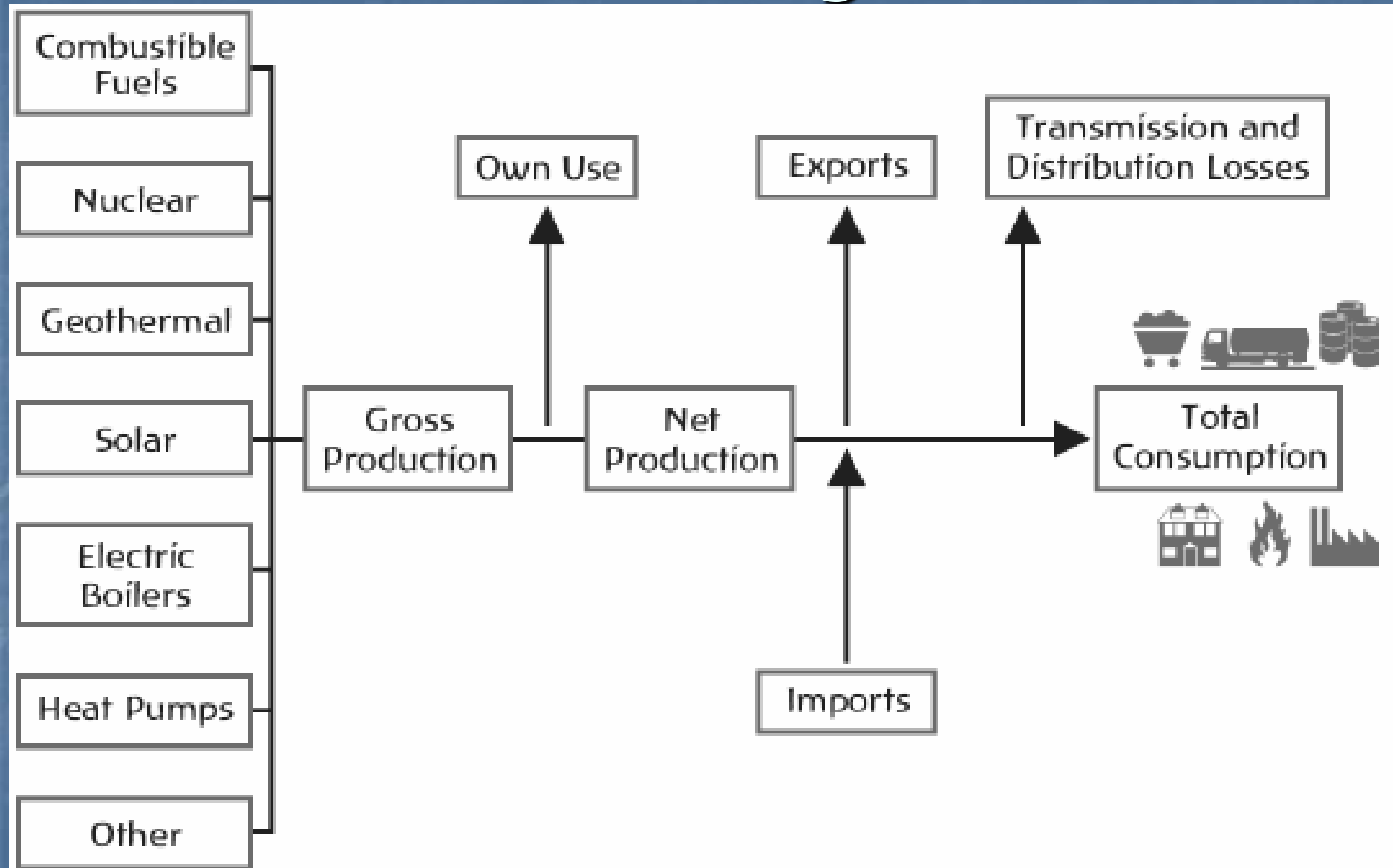
66,6%  
65,8%  
67,6%  
64,8%  
68,9%



# Energia termica

- L'energia termica è un vettore energetico impiegato per il riscaldamento ambientale e di processo
- Il suo impiego risale all'antichità
- Si considera:
  - Primaria se ottenuta da fonti naturali come geotermia, solare termico, etc.
  - Secondaria se ottenuta da reazioni nucleari o dalla combustione

# «Ciclo» dell'energia termica



# Fonti di Energia Tradizionali e non

## Tradizionali

- Energia idraulica potenziale
- Energia chimica dei combustibili
- Energia geotermica
- Energia nucleare da fissione
- ...

## Non Tradizionali

- Energia eolica
- Energia solare e fotovoltaica
- Energia delle maree
- Energia nucleare da fusione
- ...

# Fonti di Energia Rinnovabili e non

## **Rinnovabili**

- Energia idraulica potenziale
- Energia geotermica
- Energia eolica
- Energia solare e fotovoltaica
- Energia delle maree

## **Non Rinnovabili**

- Energia chimica dei combustibili
- Energia nucleare (fissione e fusione)

# Densità Energetica (centrale da 1 GW<sub>e</sub>)

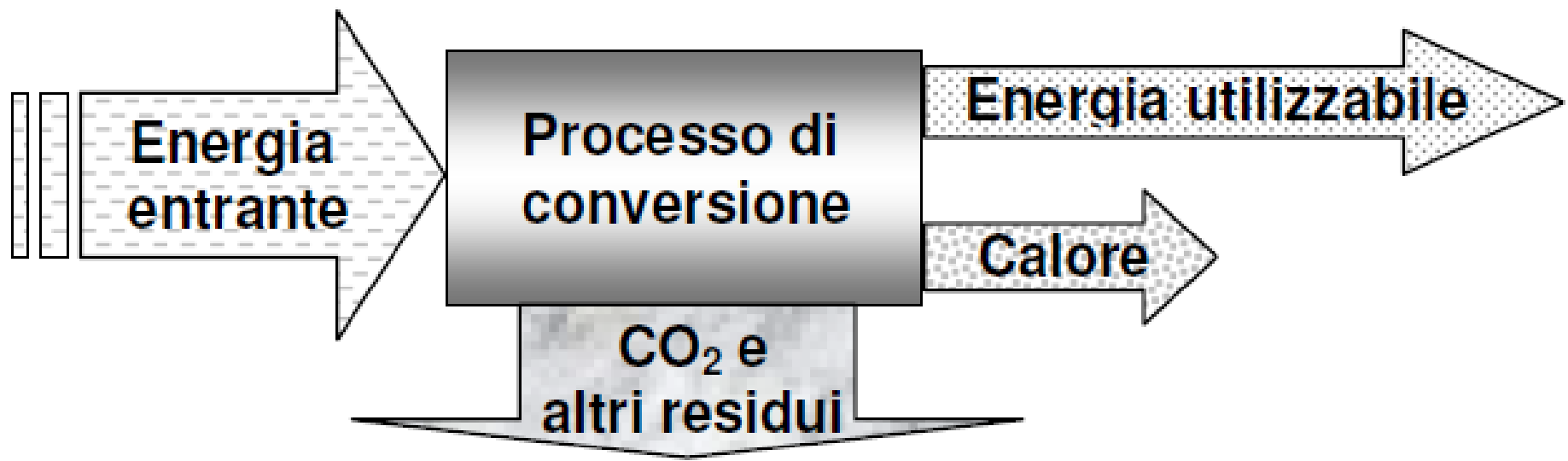
- Centrale nucleare (fissione):
  - richiederebbe circa 30 ton all'anno di U arricchito all'anno che possono essere, in linea teorica, contenute in un spazio limitato, equivalente a **1 vagone ferroviario**
- Centrale termoelettrica a petrolio:
  - richiederebbe circa un milione e mezzo di ton di combustibile all'anno stivabili in circa **28 mila vagoni**
- Centrale termoelettrica a carbone:
  - richiederebbe circa 2 milioni di ton di minerale all'anno trasportabili in **48 mila carri ferroviari**

# Combustione [1/2]

- Uno dei processi di trasformazione più noto e certamente uno dei più importanti è quello che riguarda la conversione dell'energia chimica dei combustibili (a base principalmente di carbonio) in energia meccanica
- Quest'ultima viene poi trasformata in energia elettrica mediante generatori o utilizzata direttamente per il trasporto di persone e merci, attraverso i motori a combustione interna

# Combustione [2/2]

L'energia contenuta nei legami chimici del combustibile è trasformata attraverso un processo fortemente esotermico (ad esempio la combustione che lega il carbonio con l'ossigeno atmosferico formando anidride carbonica) in energia termica e/o meccanica



# Combustibili

- I combustibili possono essere definiti come sostanze capaci di produrre energia termica a seguito di una reazione chimica di combustione
- I combustibili attualmente più noti sono i **combustibili fossili** o naturali che vengono utilizzati dopo opportuni trattamenti
- I combustibili commerciali si distinguono in genere in solidi, liquidi e gassosi
- I combustibili hanno di norma una composizione chimica prefissata: la loro composizione (e quindi anche il loro potere calorifico) varia a seconda del processo produttivo o della zona di estrazione

# Combustibili solidi

- Legna
- Carboni
  - lignite
  - antracite
  - litantrace
  - coke
- Non convenzionali
  - rifiuti solidi urbani (RSU)
  - sanse
  - vinacce



# Combustibili solidi derivati da biomasse legnose

Torba	carbonizzazione di vegetali erbacei, mescolata con terriccio, nessun uso industriale
Lignite	carbonizzazione di piante ad alto fusto
Litantrace	è il carbon fossile, bassa umidità, basso tenore di ceneri, viene distillato per produrre coke e gas combustibili
Antracite	termine estremo del processo di carbonizzazione, basso tenore di sostanze volatili, difficoltà all'innesco, uso domestico per riscaldamento
Coke	porzione di litantrace solida dopo riscaldamento a 900-1000° in assenza di aria, pregiato se poco poroso e resistente a compressione, è utilizzato in altoforno

# Legno e carboni

<b>Sostanza</b>	<b>% C</b>	<b>% H</b>	<b>% O</b>	<b>% N</b>	<b>% S</b>	<b>% ceneri</b>	<b><i>P.C.</i> (kcal/kg)</b>
Legno	50 – 54	6 – 6,5	43,5 - 44	0,3 – 0,5	0	0,5 - 1,2	2.500 – 4.500
Torba	50 – 60	5,5 – 6,5	30 - 48	0,8 – 3	0,1 - 0,2	3 – 25	3.000 – 4.500
Lignite	60 – 75	5 – 6	20 - 45	0,7 – 2	1 – 12	3 – 8	4.000 – 6.200
Litantrace	75 – 90	4,5 – 5,5	5 – 15	0,7 – 2	0,5 – 4	0,5 – 4	7.600 – 9.000
Antracite	92 – 95	2 – 2,5	3	0,5 – 1	0,5 – 2	0,5 – 2	8.300 – 9.000

# Combustibili liquidi

- I *combustibili liquidi* sono miscele di idrocarburi (nessuno è costituito da un solo componente):
  - Benzina
  - Gasolio
  - Kerosene
  - Oli combustibili
- Si distinguono a seconda del tenore di zolfo in:
  - ATZ (alto tenore di zolfo,  $S < 3 \%$ )
  - BTZ (basso tenore di zolfo,  $S < 1 \%$ )
  - STZ (senza tenore di zolfo,  $S < 0.3 \%$ , ammesso per usi civili)

# Petrolio

- Il petrolio è una miscela di idrocarburi liquidi, utilizzato per produrre combustibili liquidi e gassosi, lubrificanti e materie plastiche
- Noto fin dall'antichità, l'impiego moderno risale ai primi anni del 1900
- La composizione e il potere calorifico variano a seconda del giacimento (Brent, etc.)
- Si considera una fonte primaria e non viene di norma utilizzato direttamente

# Origine del petrolio

- Bacini sedimentari marini, caratterizzati da ampia formazione di materia organica in assenza o con scarsa ossidazione
- La materia organica viene sepolta e durante milioni di anni viene in parte trasformata in idrocarburi liquidi (e gassosi)
- Questi tendono a essere «strizzati» fuori dai sedimenti fangosi in via di compattazione e sono spinti negli strati permeabili adiacenti
- Accumulo possibile solo in presenza di una combinazione di strutture e tipi di rocce che creino una riserva ed una trappola (anticlinale)
- Teoria «alternativa» russo-ucraina:
  - origini abiotiche del petrolio nelle profondità della Terra (materiale primordiale eruttato da grandi profondità)
  - abbondanza limitata solo dalla quantità dei suoi componenti presenti al momento della formazione della Terra
  - disponibilità legata sostanzialmente solo dallo sviluppo tecnologico e della competenza nelle esplorazioni

# Sfruttamento dei giacimenti di petrolio

- Individuazione del giacimento (prospezione sismica 3D o altre tecniche come la gravimetrica e la magnetica)
- Perforazione (fino a oltre 6 km di profondità, anche off-shore in bacini profondi ~3000 m)
- Produzione progressiva:
  - gas (in passato per lo più bruciato in torcia)
  - olio combustibile
- La produzione può essere migliorata (10÷15%) per iniezione di gas (parte superiore del giacimento) o di acqua (parte inferiore), ma aumentano i costi (50÷100%)
- Trasporto via oleodotto e/o petroliera: il 64% del petrolio mondiale è stato esportato nel 2006

# Combustibili liquidi derivati del petrolio

Benzina	prima frazione di distillazione (Temperatura di ebollizione = 30-200°C), miscela di idrocarburi con 4-12 atomi di C, alta volatilità, elevato potere antidetonante
Cherosene	seconda frazione di distillazione (T.eb.=150-280 °C), densità più elevata della benzina, bassa volatilità, usato per alimentazione di motori a turbina, riscaldamento
Gasolio	terza frazione di distillazione (T.eb.= 250-350°C), usato per motori diesel, elevata tendenza all'accensione spontanea
Oli combustibili	residui della distillazione, viscosità variabile, ma piuttosto elevata

# Caratteristiche derivati del petrolio

<i>Product</i>	<i>Density kg/m<sup>3</sup></i>	<i>Litres per tonne</i>	<i>Gross calorific value (GJ/t)</i>	<i>Net calorific value (GJ/t)<sup>(1)</sup></i>
<i>Ethane</i>	366.3	2730	51.90	47.51
<i>Propane</i>	507.6	1970	50.32	46.33
<i>Butane</i>	572.7	1746	49.51	45.72
<i>LPG<sup>(2)</sup></i>	522.2	1915	50.08	46.15
<i>Naphtha</i>	690.6	1448	47.73	45.34
<i>Aviation gasoline</i>	716.8	1395	47.40	45.03
<i>Motor gasoline<sup>(3)</sup></i>	740.7	1350	47.10	44.75
<i>Aviation turbine fuel</i>	802.6	1246	46.23	43.92
<i>Other kerosene</i>	802.6	1246	46.23	43.92
<i>Gas/diesel oil</i>	843.9	1185	45.66	43.38
<i>Fuel oil, low-sulphur</i>	925.1	1081	44.40	42.18
<i>Fuel oil, high-sulphur</i>	963.4	1038	43.76	41.57

# Combustibili gassosi

- GPL o gas di petrolio liquefatti (miscele di propano e butano ed altri prodotti leggeri di distillazione del petrolio, che, sottoposti a moderate pressioni  $\sim 10$  bar, diventano liquidi e sono contenuti in bombole)
- Gas di città (miscela di idrogeno, metano e monossido di carbonio prodotto dalla distillazione o dalla gassificazione del carbone)
- Gas naturale (ha sostituito il gas di città)
- Gas di impiego industriale:
  - acetilene
  - gas d'altoforno (monossido di carbonio)

# Gas naturale

- Il gas naturale è una miscela di diversi gas, ma in prevalenza è composto di  $\text{CH}_4$  ( $\sim 70\div 90\%$ ), utilizzato per produrre luce, calore o energia elettrica nelle centrali termoelettriche
- Noto fin dall'antichità (Delfi) era già usato dai cinesi nel 500 a.C.
- La composizione e il potere calorifico variano a seconda del giacimento che può essere associato o meno a quello del greggio (o alle miniere di carbone)
- Si considera una fonte primaria

# Trasporto del gas naturale

- Più di 1/4 del gas mondiale viene esportato (3/4 del quale via gasdotto)
- Gasdotto (60 bar):
  - distanza a parità di diametro 1/5 di un oleodotto
  - stazioni di ricomprensione ogni 100÷200 km
- Marittimo:
  - GNL a pressione atmosferica e  $-160^{\circ}\text{C}$  (vol. = 1/600)
  - terminali di liquefazione ( $8\div 9 \text{ Gm}^3$  - 300 MW<sub>e</sub>)
  - navi da 130000 m<sup>3</sup> trasportano 80 milioni Nm<sup>3</sup>
- Trasporto e distribuzione nazionale:
  - rete di trasporto (20 bar)
  - stazioni di decompressione
  - rete di distribuzione locale (1÷4 kPa)

# Caratteristiche di alcuni combustibili liquidi e gassosi

<b>Combustibile</b>	<b>MJ/volume</b>	<b>kcal/massa</b>
<b>Gasolio</b>	41 MJ/l	9.799 kcal/kg
<b>Benzina</b>	44 MJ/l	10.031 kcal/kg
<b>Alcool etilico</b>	22 MJ/l	6.479 kcal/kg
<b>Propano</b>	99,2 MJ/Nm <sup>3</sup>	11.796 kcal/kg
<b>Butano</b>	124,9 MJ/Nm <sup>3</sup>	10.984 kcal/kg
<b>Metano</b>	36,0 MJ/Nm <sup>3</sup>	11.940 kcal/kg
<b>Idrogeno</b>	10,8 MJ/Nm <sup>3</sup>	28.567 kcal/kg

# Principali caratteristiche dei combustibili commerciali

Combustibile	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	$H_i$ [MJ/kg]	$a_t$ [kg <sub>a</sub> /kg <sub>c</sub> ]	$H/a_t$ [MJ/kg]	Temp. di accensione [°C]	CO <sub>2</sub> gen. [kg/MJ]
Legna secca	500-800	18-20	5.8-6.7	3.1		0.096
Lignite		20.5				
Litantrace		26				
Antracite		30.5				
Coke	1000	30.2	10.1	2.99		0.103
RSU(*)	100	8	2.7	2.96		0.103
Benzina	730-760	44	14.7	2.99	400	
Gasolio	815-855	43.3	14.7	2.95	250	0.073
Olio denso	950	41.1	13.8	2.98		0.077
Gas di città	0.56÷0.61	30	10	3.00		
GPL	2.25	46	15.5	2.97	400	0.065
Gas naturale	0.83	47.7	17.3	2.76	560	0.056
Butano	2.7	45.7	15.4	2.97	365	
Acetilene	1.17	48.1	13.3	3.61	305	

(\*) Rifiuti Solidi Urbani

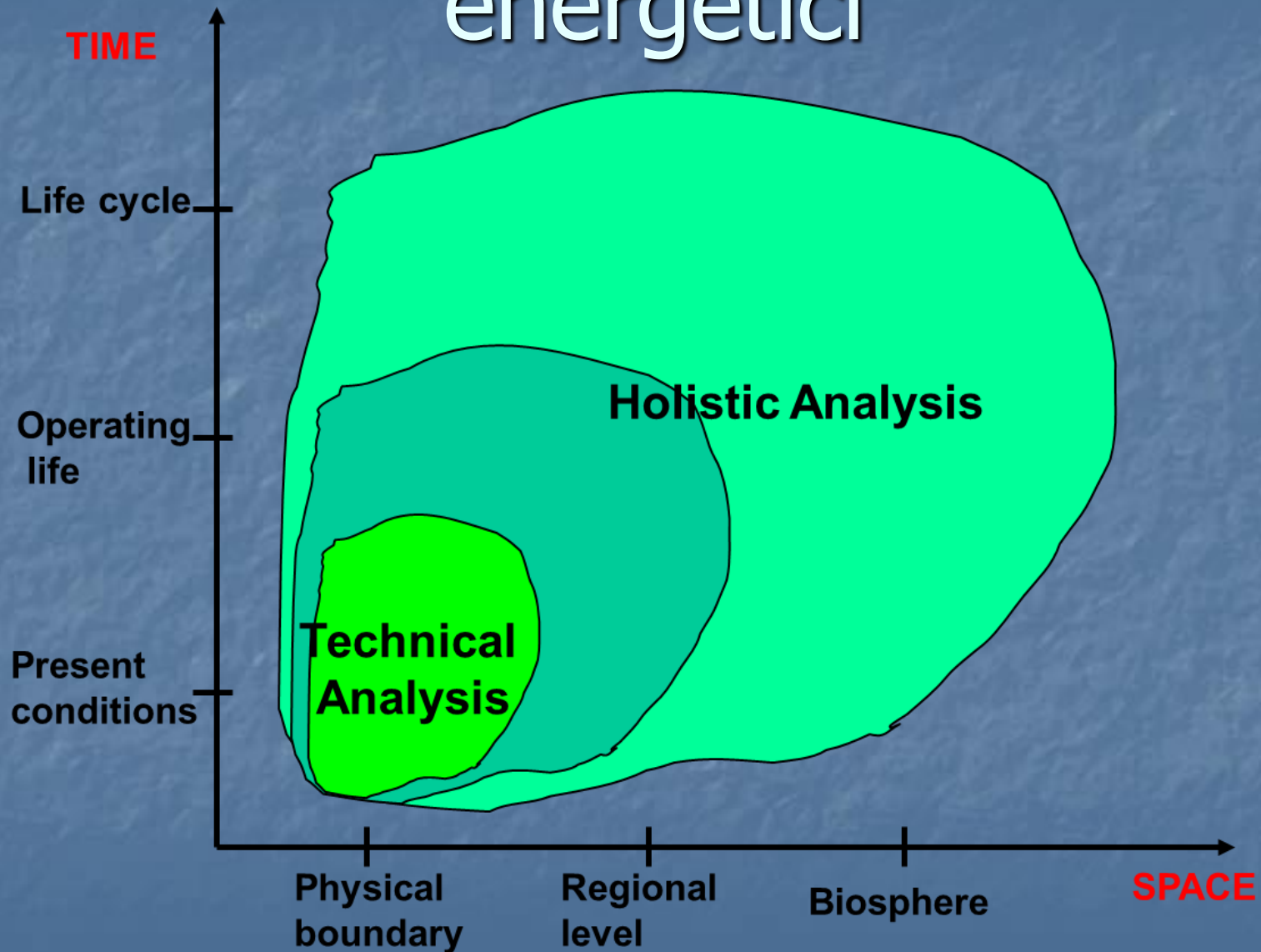
# Rendimento

Dispositivo	Trasformazione energia		rendimento
Motore a vapore	da termica	a meccanica	15-25%
Motore a scoppio	da chimica	a meccanica	20-30%
Bruciatore a gas	da chimica	a termica	30-40%
Ferro da stiro	da elettrica	a termica	90-95%
Elettrovalvola	da termica	a elettrica	20-25%
Accumulatore	da elettrica	a chimica	70-75%
Pila	da chimica	a elettrica	60-70%
Dinamo	da meccanica	a elettrica	90-92%
Motore elettrico	da elettrica	a meccanica	85-90%
Centrali elettriche ad olio combustibile	da chimica	a elettrica	35-40%
Centrali a turbogas a cicli combinati	da chimica	a elettrica	55-65%
Centrali elettriche a carbone	da chimica	a elettrica	35-40%
Fotosintesi	da solare	a biomassa	0,5%
Fotovoltaico	da solare	a elettrica	6-15%
Lampade ad incandescenza	da elettrica	a luminosa	<10%
Lampade a led	da elettrica	a luminosa	47-64%

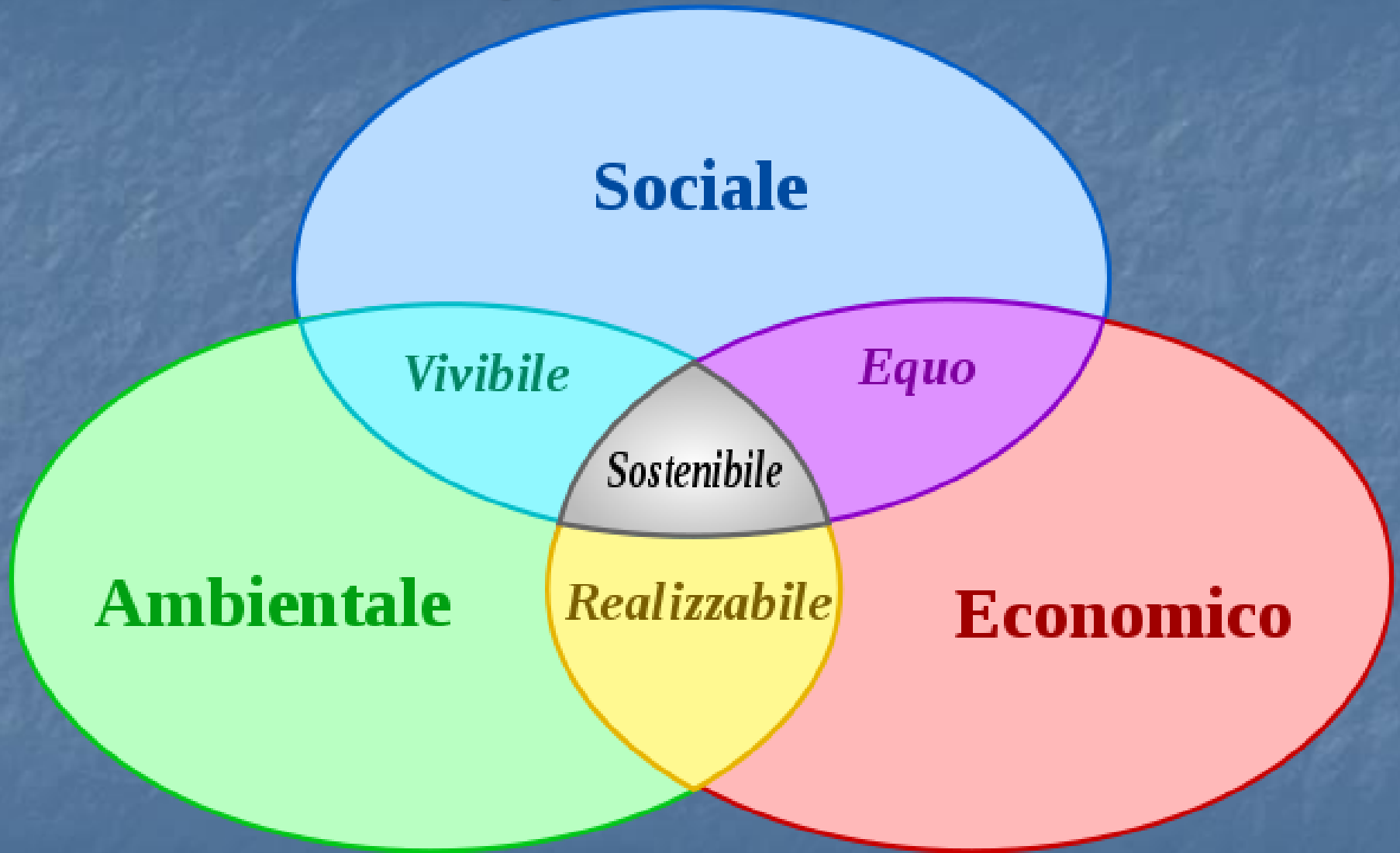
# EROEI

- Per misurare la resa energetica di tutta la catena di approvvigionamento di una fonte sono state proposte varie metodologie che permettono di calcolare coefficienti come, ad esempio, il Ritorno Energetico sull'Investimento (in inglese Energy Return On Energy Investment, EROEI)
- Questo indice viene calcolato come rapporto fra l'energia ricavata da un impianto o con una certa tecnologia e tutta l'energia spesa per ottenerlo
- In pratica, può essere utile per confrontare diverse tecnologie o stimare quanta energia viene ricavata da un impianto nella sua vita media rispetto a quella impiegata per costruirlo e mantenerlo

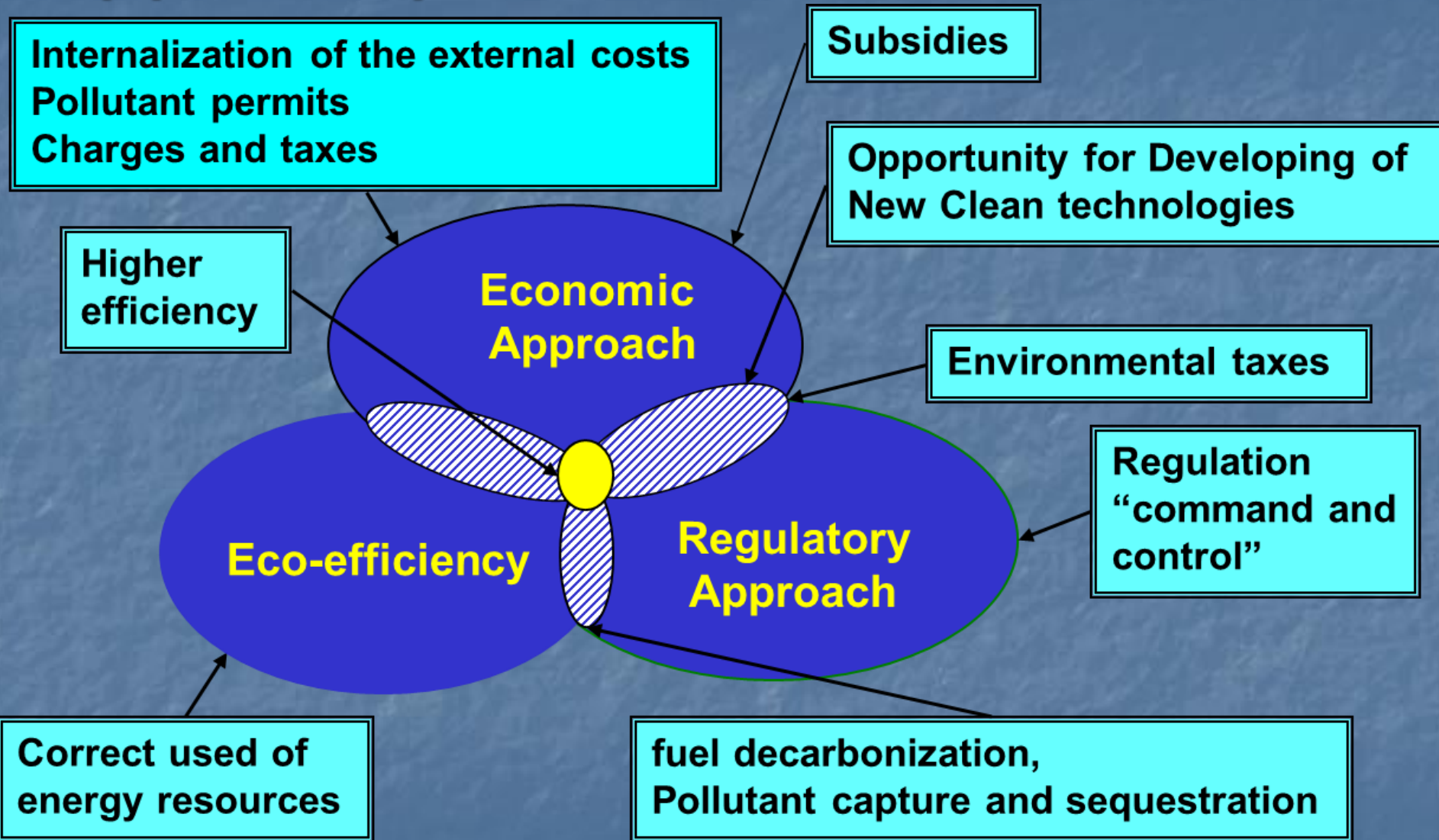
# Analisi multi-obiettivo di sistemi energetici



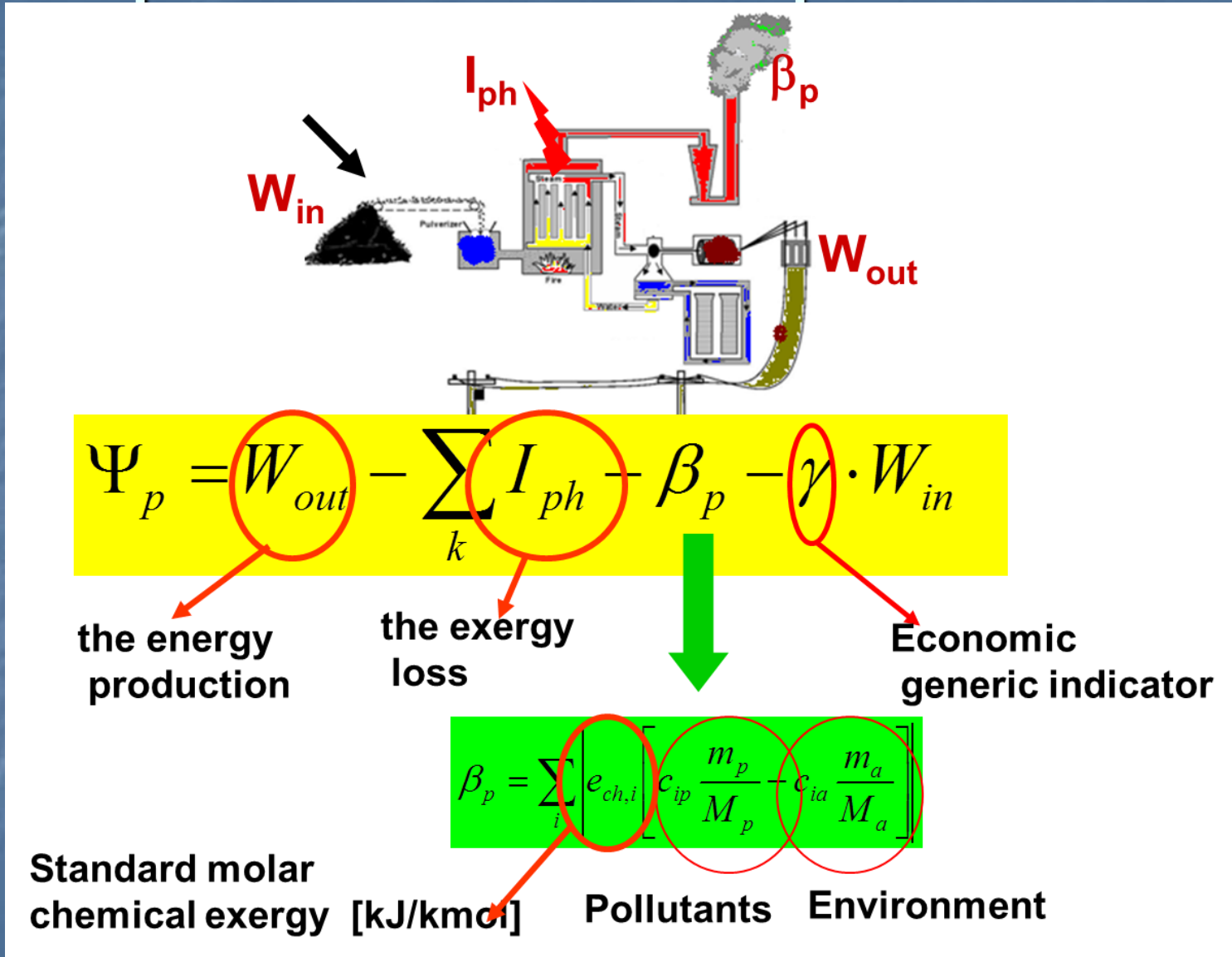
# Sviluppo Sostenibile



# Approcci per analisi di sostenibilità



# Esempio di funzione parametrica



# Parametri per definizione funzione

## Macro-aspects

## Indicators

### Thermodynamic

Relative to the First law of thermodynamics  
Relative to the second law of thermodynamics  
Irreversibility of the single components of the plant  
Quality index of the fuel utilization  
Raw energy conversion coefficient

### Environmental

Emission to the atmosphere/energy produced ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ )  
Emissions to the water/energy produced (release P- and N- rich waste into water bodies)  
Heat Reject to the Environment/energy produced (specially to the water bodies)  
Land use/energy produced  
Fuel resource used/energy produced  
Stratospheric  $\text{O}_3$  depletion/energy produced  
Tropospheric  $\text{O}_3$  and "Photosmog" /energy produced  
Ecotoxicity (heavy metals, toxic waste etc.) /energy produced  
Ecological Footprint

### Economic

Total Capital Costs of the plant/energy produced  
Operation and Maintenance Costs/energy produced  
Cost of Resources/energy produced  
Profit index  
Unit energy cost  
Internal Rate of Return  
Microeconomics analysis considering the whole plant life cycle  
The life-cycle costing  
Internal rate of return

# Sull'energia nucleare il popolo italiano è disinformato...

Sin dal 1973 la Commissione dell'Unione Europea conduce inchieste periodiche, note come Eurobarometri, sull'opinione e gli atteggiamenti dei cittadini europei nei confronti di varie tematiche di interesse, fra cui l'energia nucleare.

Indagini statistiche dell'Eurobarometro dimostrano inconfutabilmente che una adeguata conoscenza della tematica e favore per essa sono in relazione crescente.

Alcuni risultati relativi all'Italia...

***“Alcuni centri di ricerca producono rifiuti radioattivi: vero o falso?”***



**Più alta percentuale di risposte corrette: Svezia (86%)  
Italia (14%)**

***“Alcuni ospedali producono rifiuti radioattivi di basso livello: vero o falso?”***



**Più alta percentuale di risposte corrette: Belgio (84%)  
Italia (21%)**

*“Ci sono diverse categorie di rifiuti radioattivi, intermedia, bassa ed alto livello. Vero o falso?”*



**Più alta percentuale di risposte corrette: Slovenia (88%)  
Italia (18%)**

*“Alcune industrie non-nucleari producono rifiuti radioattivi di basso livello: vero o falso?”*



**Più alta percentuale di risposte corrette: Repubblica Ceca (79%)  
Italia (20%)**

# Emissioni di CO<sub>2</sub> evitate con il nucleare negli USA già nel 2008

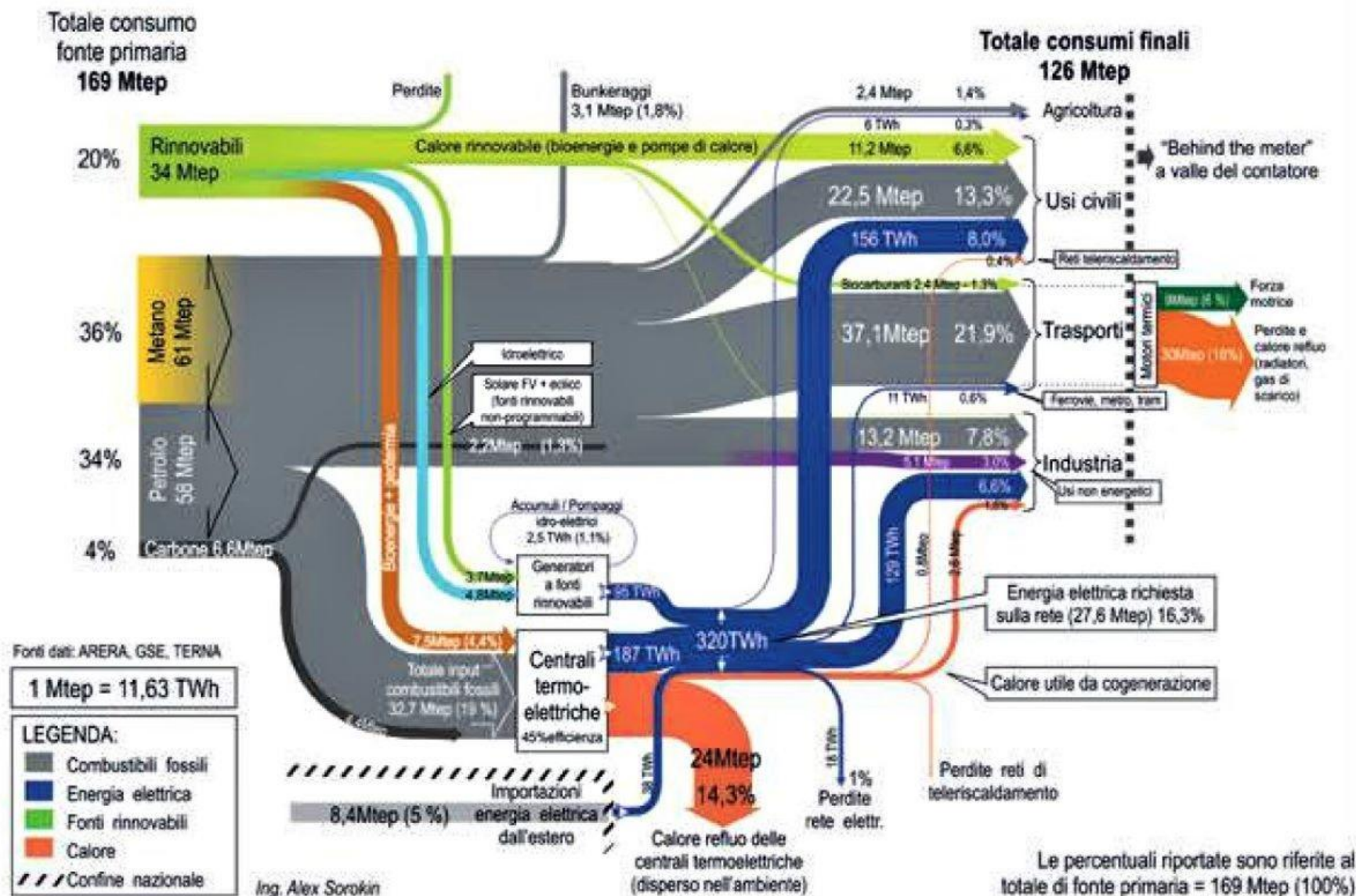
- ~20% la quota di nucleare nella produzione di elettricità statunitense
- 692 milioni di tonnellate/anno
- **Pari circa alle emissioni CO<sub>2</sub> originate dalla circolazione di tutte le autovetture negli USA**
- Corrisponde al 29% del totale delle emissioni statunitensi di CO<sub>2</sub> da settore elettrico: 2386 miliardi di tonnellate/anno (dati WEO 2008 EIA)

# Nucleare & Salute

- Uno studio della Columbia University è stato condotto su 53000 lavoratori di 15 centrali nucleari statunitensi, seguiti per 18 anni (1979 e 1997):
  - Lo studio ha evidenziato un tasso di mortalità inferiore del 60% ai valori medi di quelli rilevati su una popolazione simile per sesso ed età
  - I ricercatori lo hanno soprannominato “effetto lavoratore sano” (i dipendenti effettuano regolarmente dei check up sanitari)
  - Uno dei risultati più rimarchevoli della ricerca è che la correlazione tra il tasso di mortalità per leucemia e tumore sui lavoratori nucleari non è statisticamente rilevante ed è allineato alle altre fasce di popolazione
- Analoghi studi con analoghi risultati sono stati fatti in Francia e in UK
- The NCI (National Cancer Institute) report, *Cancer in populations living near nuclear facilities*, studied more than 900000 cancer deaths from 1950-1984 from mortality records in counties containing nuclear facilities:
  - At the time, it was the broadest study of its type ever to be conducted
  - The NCI report showed no increased risk of death from cancer for residents of the 107 US counties containing or closely adjacent to 62 nuclear sites including all of the country's power reactors operational before 1982

# Bilancio energetico - Italia 2019

Principali fonti, flussi ed usi finali dell'energia

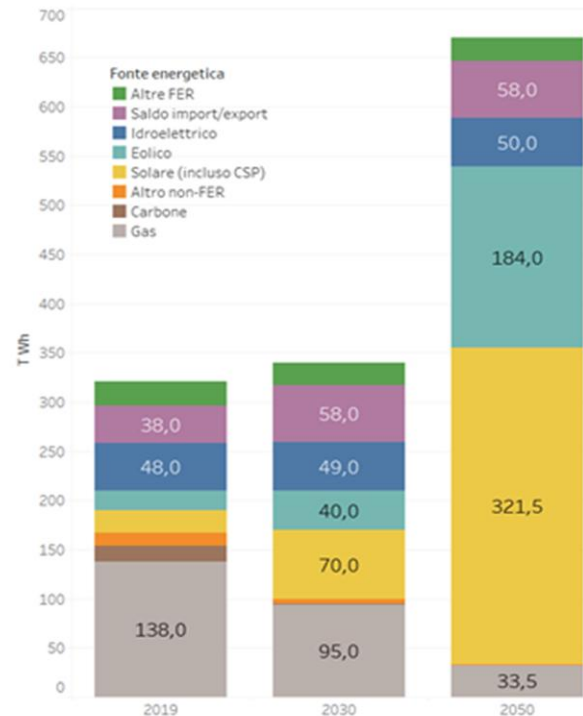


# ...ed il futuro?

- Facendo riferimento all'anno 2050 viene delineata la seguente situazione:

## L'EVOLUZIONE DEL MIX ELETTRICO AL 2050

Dati in TWh



Fonte: elaborazioni Laboratorio REF Ricerche su dati Terna e Snam (per 2019 e 2030)

- Domanda di 670 TWh (doppia rispetto al 2019)
  - 5 % del fabbisogno coperto da combustibili fossili (gas)
  - Aumento marginale idroelettrico
  - Saldo Import/export mantenuto costante
  - Contributo di altre fonti di energia rinnovabile costante
  - Circa 505 TWh coperti da uno sviluppo sostenuto di solare ed eolico in tutte le loro declinazioni
- Lo scenario elettrico risulta completamente stravolto e si avrebbe una produzione gigantesca delle rinnovabili: aumento di generazione di 14 volte per il solare e di 9 volte per l'eolico, con tassi di installazione annui di potenza moltiplicati più volte (per il solare ad esempio diverrebbe 10 volte più grande rispetto a quello che ha contraddistinto il 2019)

# Le problematiche di un mix di generazione sbilanciato sulle fonti rinnovabili

- Non programmabilità della produzione elettrica (in assenza di stoccaggio)
- Lievitazione dei costi per lo stoccaggio ed il trasporto dell'energia
- Scarsa sicurezza/stabilità di rete
- Limitata disponibilità di materie prime critiche necessarie per la costruzione di tali tecnologie

# ITALIA (PNIEC) Scenario 1:

## installazione di alcuni impianti nucleari di grossa taglia con riferimento allo scenario energetico al 2030

- 121.8 TWh derivanti dall'uso dei combustibili fossili
- Si ipotizza di coprire 1/3 di questi (40.6 TWh) attraverso l'inserimento dell'energia nucleare nel sistema elettrico
- 4 reattori EPR da 1600 MWe, investimento stimato di 16 miliardi di euro
- Risparmio di oltre 4 miliardi di m<sup>3</sup> di gas il cui costo (attualmente) si aggirerebbe tra i 4.5 e 5 miliardi di euro
- Il prezzo del kWh nucleare dipende dal costo del combustibile nell'ordine del 5 %
- Soluzione implementativa di difficile realizzazione per limiti temporali, burocratici e di accettazione sociale



## Italia (PNIEC) Scenario 2:

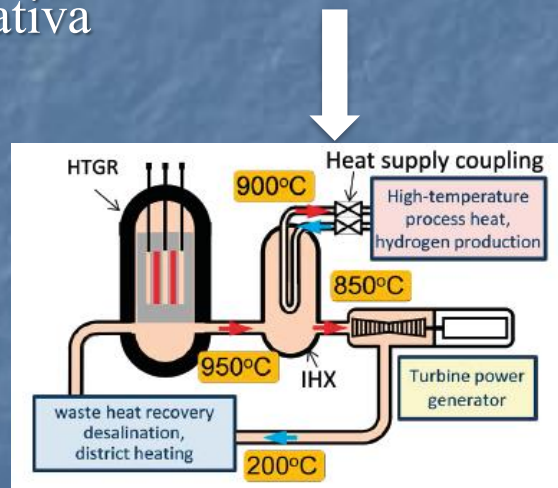
# installazione combinata di impianti nucleari di grossa taglia ed alcuni reattori HTR con riferimento allo scenario energetico al 2050

- Ipotizzando in questo scenario di ricoprire una quota energetica ragionevole del 20% sul totale (pari a 134 TWh) attraverso lo sfruttamento dell'energia nucleare le possibili implementazioni sarebbero le seguenti:
  - 11 reattori EPR
  - 16 reattori AP1000
  - Installazione combinata di 10 reattori EPR e 5 HTGR (es. GTHTR300C)
- Di notevole interesse è l'ultima implementazione proposta, nella quale si potrebbe valutare lo sfruttamento del calore nucleare per attività cogenerativa in diversi ambiti
- I reattori HTR installati darebbero (a scelta del gestore in funzione dell'andamento della domanda) la possibilità di alimentare la rete elettrica in perfetta analogia ai reattori di grande taglia oppure di partecipare a processi cogenerativi



# Italia (PNIEC) Scenario 3: installazione esclusivamente di reattori HTR [1/2]

- Nel terzo scenario si fa l'ipotesi di installare esclusivamente dei reattori HTR, non prendendo in considerazione lo sfruttamento di impianti di grossa taglia con l'immediato vantaggio di non dover affrontare tematiche spinose come i notevoli costi di realizzazione, tempi di implementazione piuttosto lunghi e problemi di manutenzione e sicurezza, quest'ultima punto di forza invece per i reattori considerati
- Viene ipotizzato di coprire una quota del carico più contenuta rispetto allo scenario 2 per non dover installare un numero di reattori eccessivo, disponendo però di un'ampia capacità cogenerativa



# Italia (PNIEC) Scenario 3: installazione esclusivamente di reattori HTR [2/2]

In uno scenario di questo tipo si potrebbero effettuare le seguenti ipotesi ed assunzioni, con lo scopo di delineare una valutazione termo-economica di riferimento:

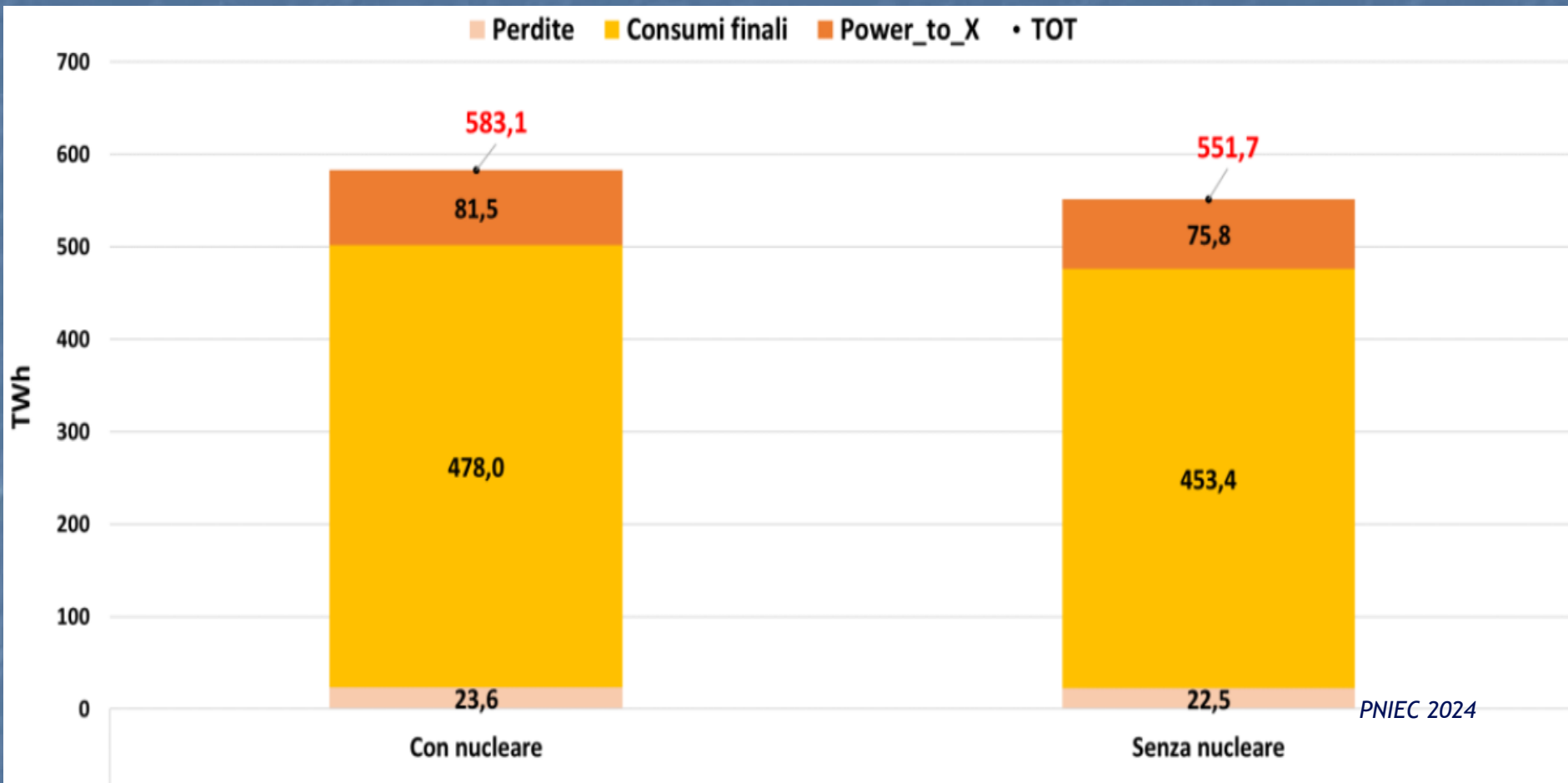
- Potenza media installata per ciascun reattore di 250 MW<sub>e</sub>
- Obiettivo: soddisfacimento del 5% della domanda di riferimento stimata al 2050



- Installazione di circa 17 reattori
- Costo stimato per ciascun reattore 1-2 miliardi di euro (1/2 o 1/3 dei reattori EPR e AP1000)
- Installazione più semplice e rapida, con più possibilità di localizzazione sul territorio



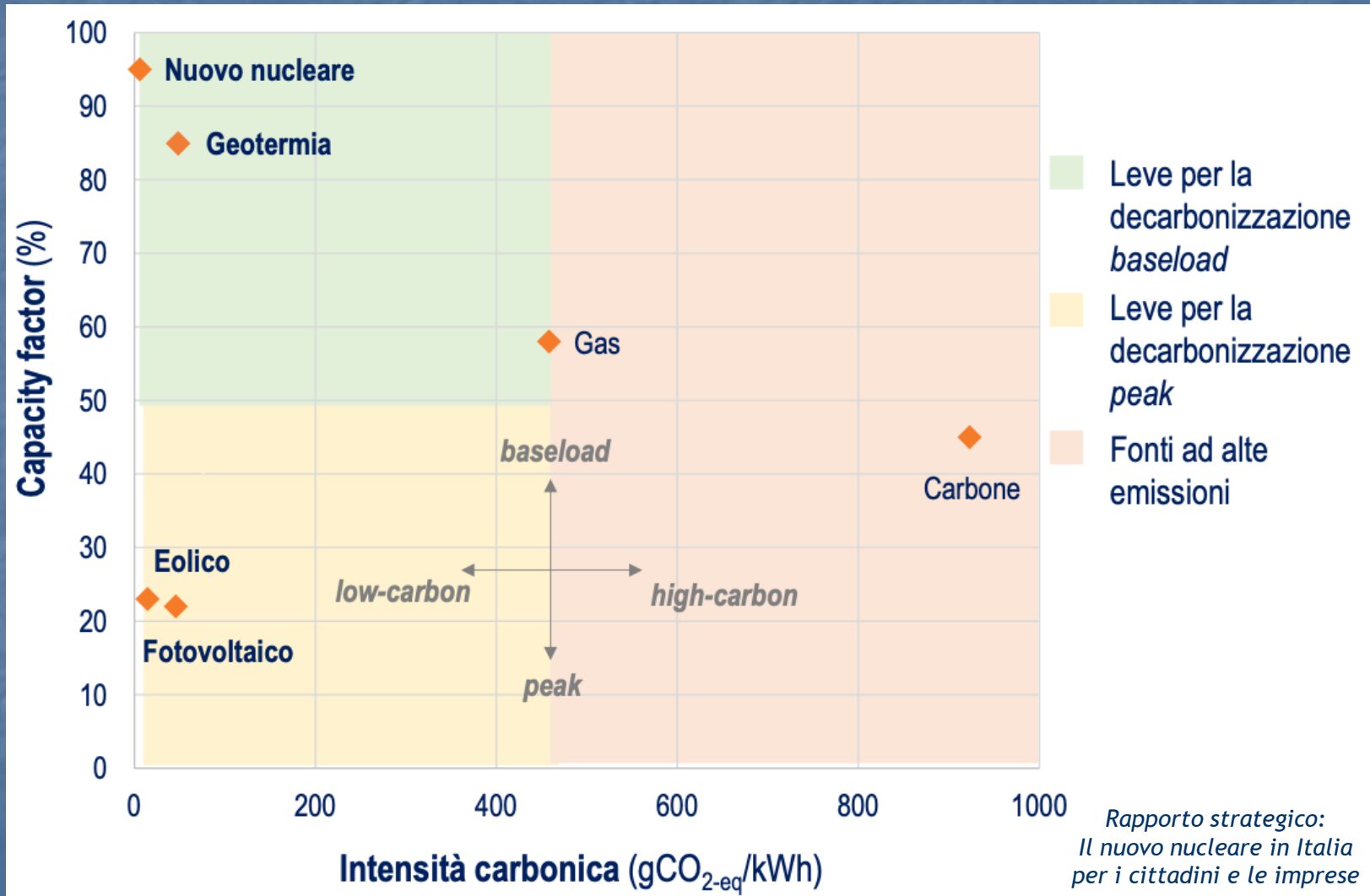
# Previsioni al 2050 del PNIEC 2024



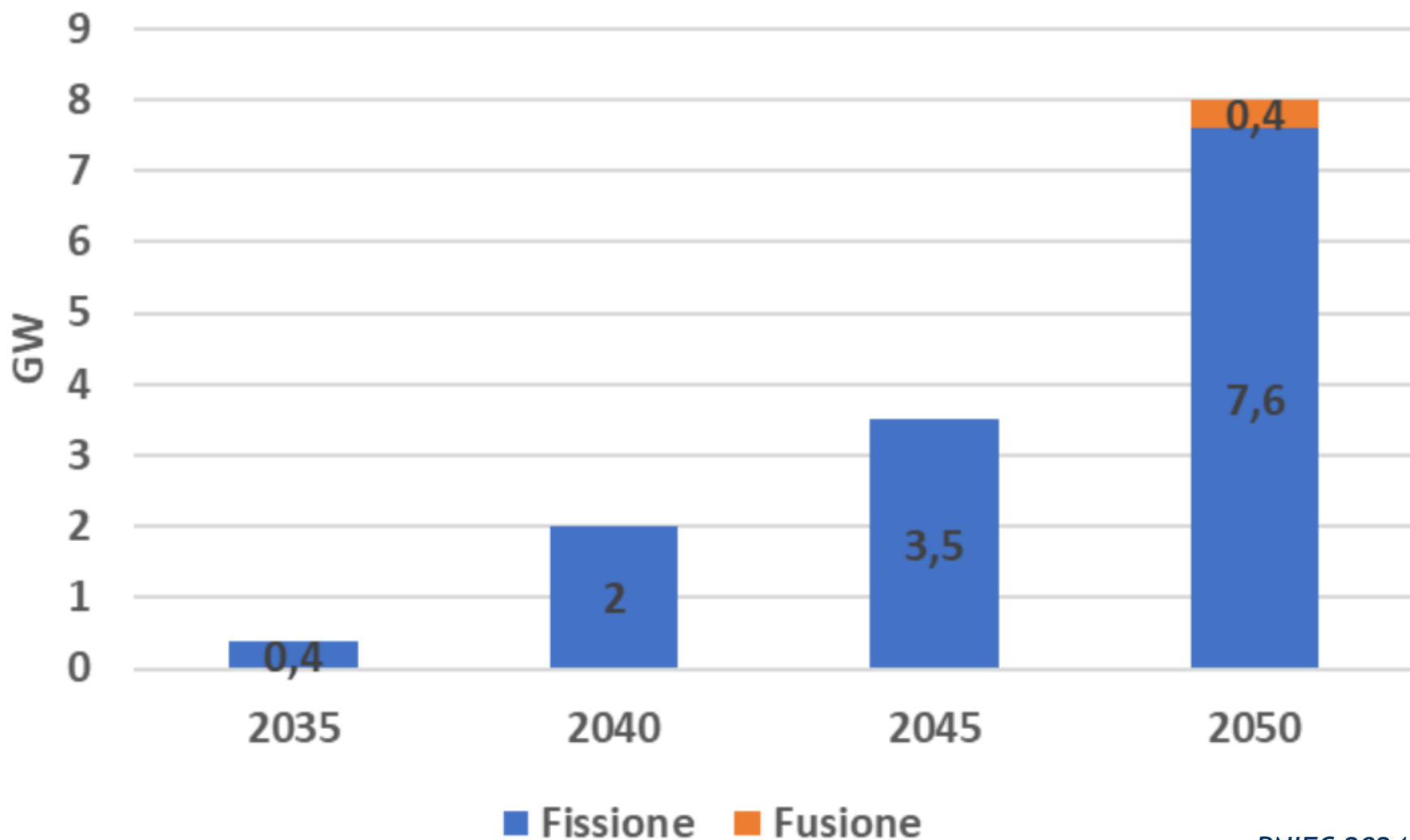
# Scenari futuri delineati dal PNIEC 2024

- *Nucleare moderato*: Attualmente risulta lo scenario più attendibile e prevede una reintroduzione dell'energia nucleare che arrivi al 2050 con una capacità installata di 8 GW
- *Nucleare senza limitazione*: Rappresenta uno scenario ancora utopistico dove vengono utilizzare tutte le risorse disponibili, permettendo di arrivare al 2050 con una capacità installata di 16 GW

# Un confronto fra il nuovo nucleare e le fonti rinnovabili



# Evoluzione della potenza nucleare installata



PNIEC 2024

# Possibile sviluppo della flotta di reattori italiani (esempio)

Tipologia di reattore	Numero di unità operative al 2035	Numero di unità operative al 2040	Numero di unità operative al 2045	Numero di unità operative al 2050
NUWARD <sup>tm</sup>	2	7	12	17
LFR-AS-200	0	0	2	6
HTR-PM	0	0	2	4
Fusione nucleare	0	0	0	1
<b>Capacità installata [GW]</b>	<b>0.68</b>	<b>2.38</b>	<b>4.9</b>	<b>8.22</b>

Lo scienziato non è l'uomo  
che fornisce le vere risposte:  
è quello che pone le vere domande  
(Claude Lévi Strauss)