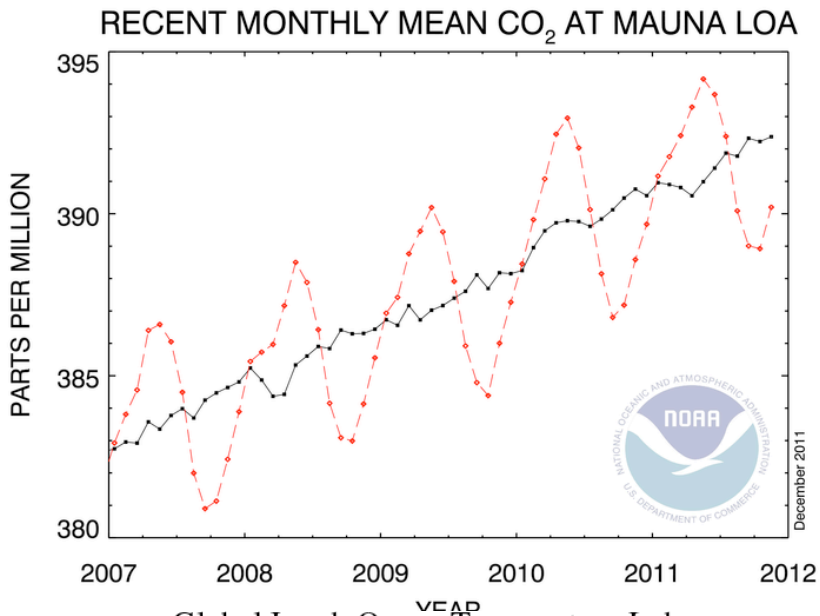
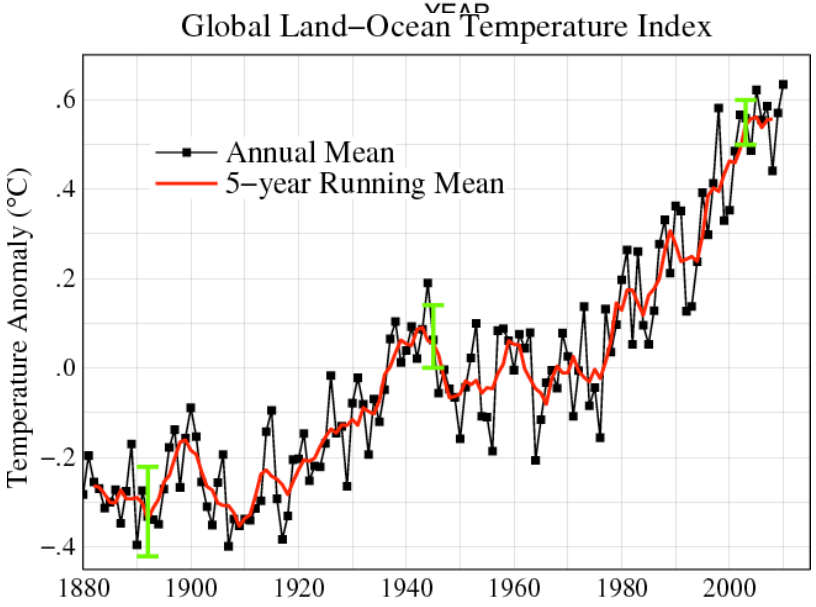
# Energie rinnovabili

# *Outline*

- *Inquadramento generale*
- *Ciclo completo*
  - *Energia elettrica dal sole*
  - *Idrogeno per autotrazione*
  - *Riscaldamento domestico con pompe di calore a elettricità*
- *Altre rinnovabili*

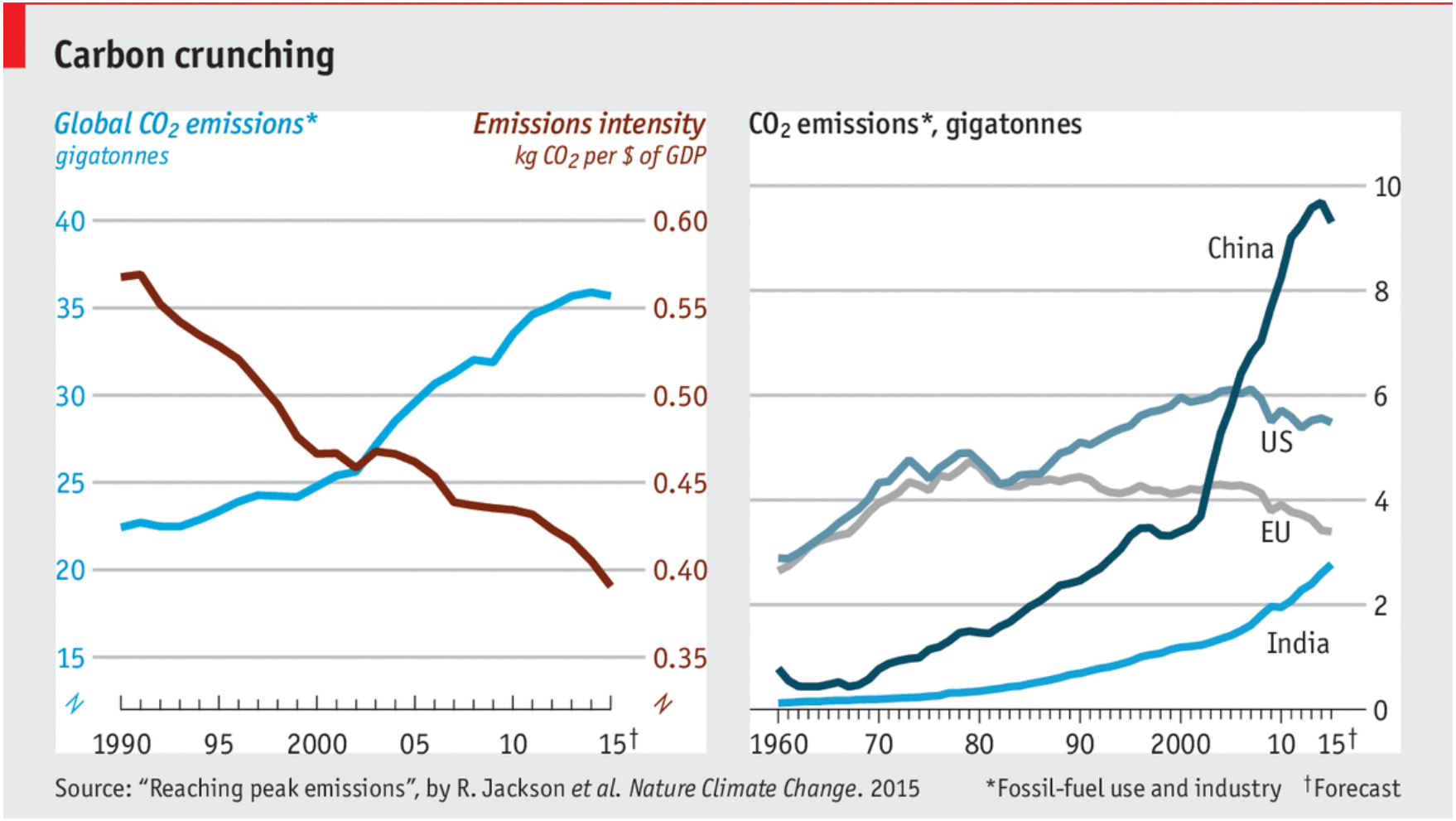
# Problemi ambientali



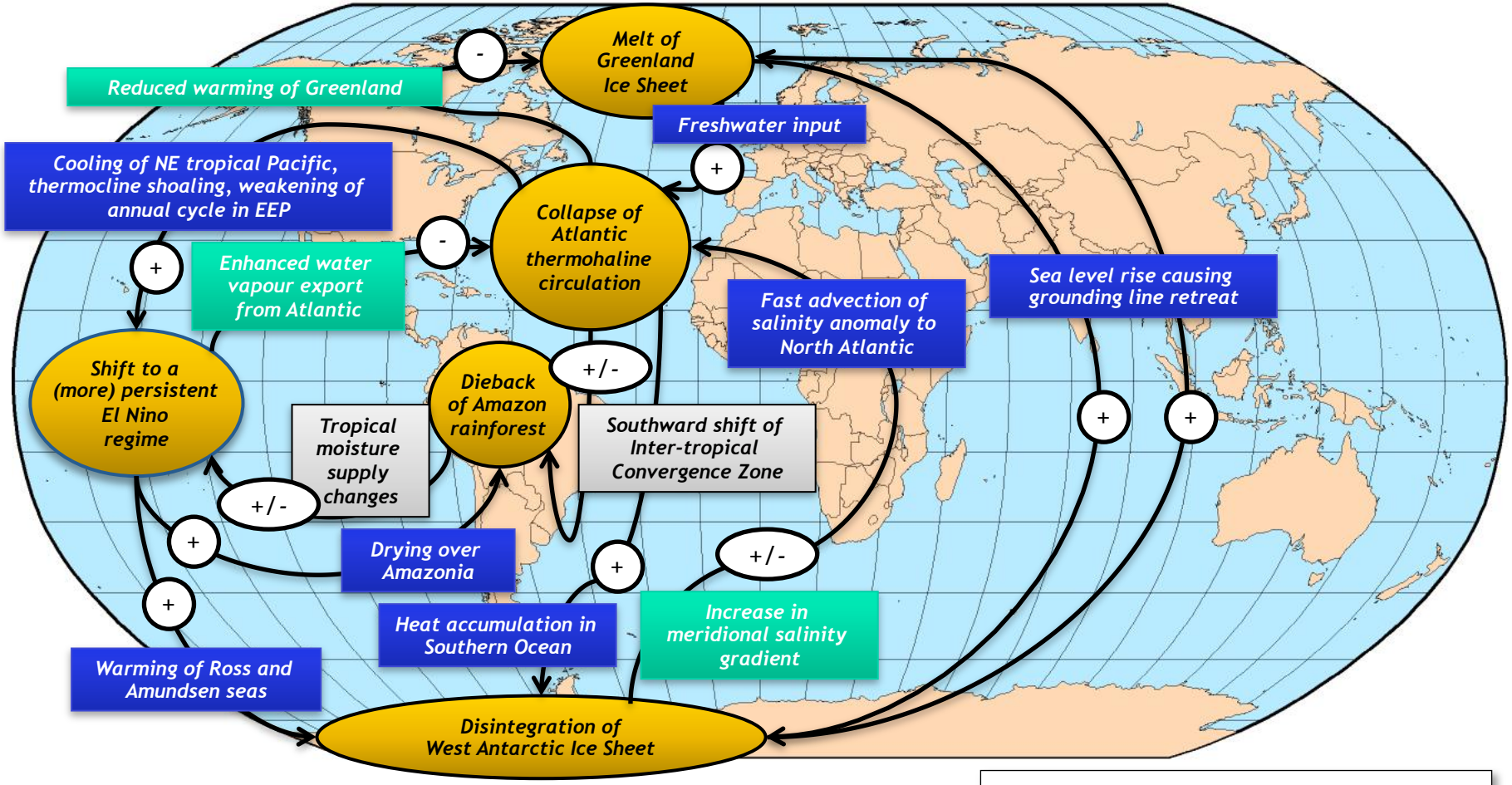



*http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/*

# Problemi ambientali



# Tipping points

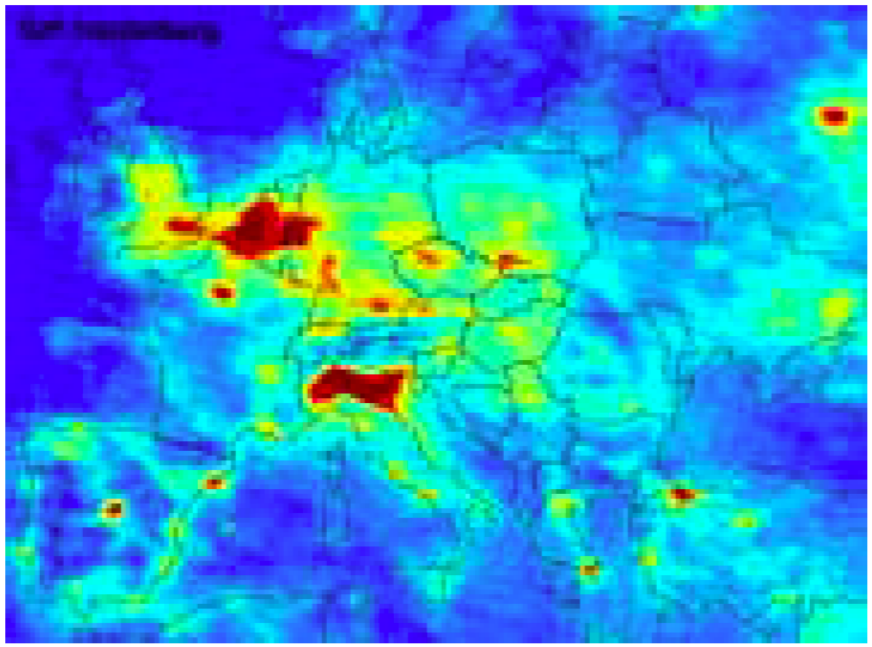



*Tipping events are connected A→B if at least 5 experts judged that triggering A had a direct effect on the probability of triggering B thereafter*

***Based on results from expert elicitation***

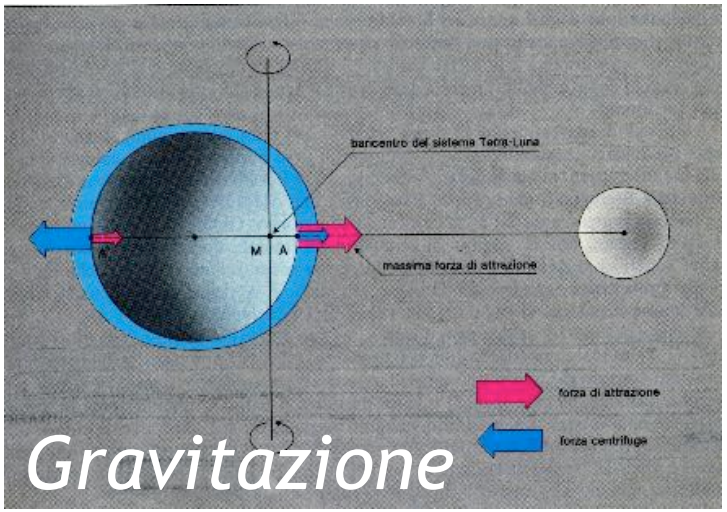
*Da: Tim Lenton, "Tipping Points or Gradual Climate Change?", Erice 2007*

# *Inquinamento - $NO_2$ (satellite Sciamachy)*



Uni Heidelberg

# Energia naturale

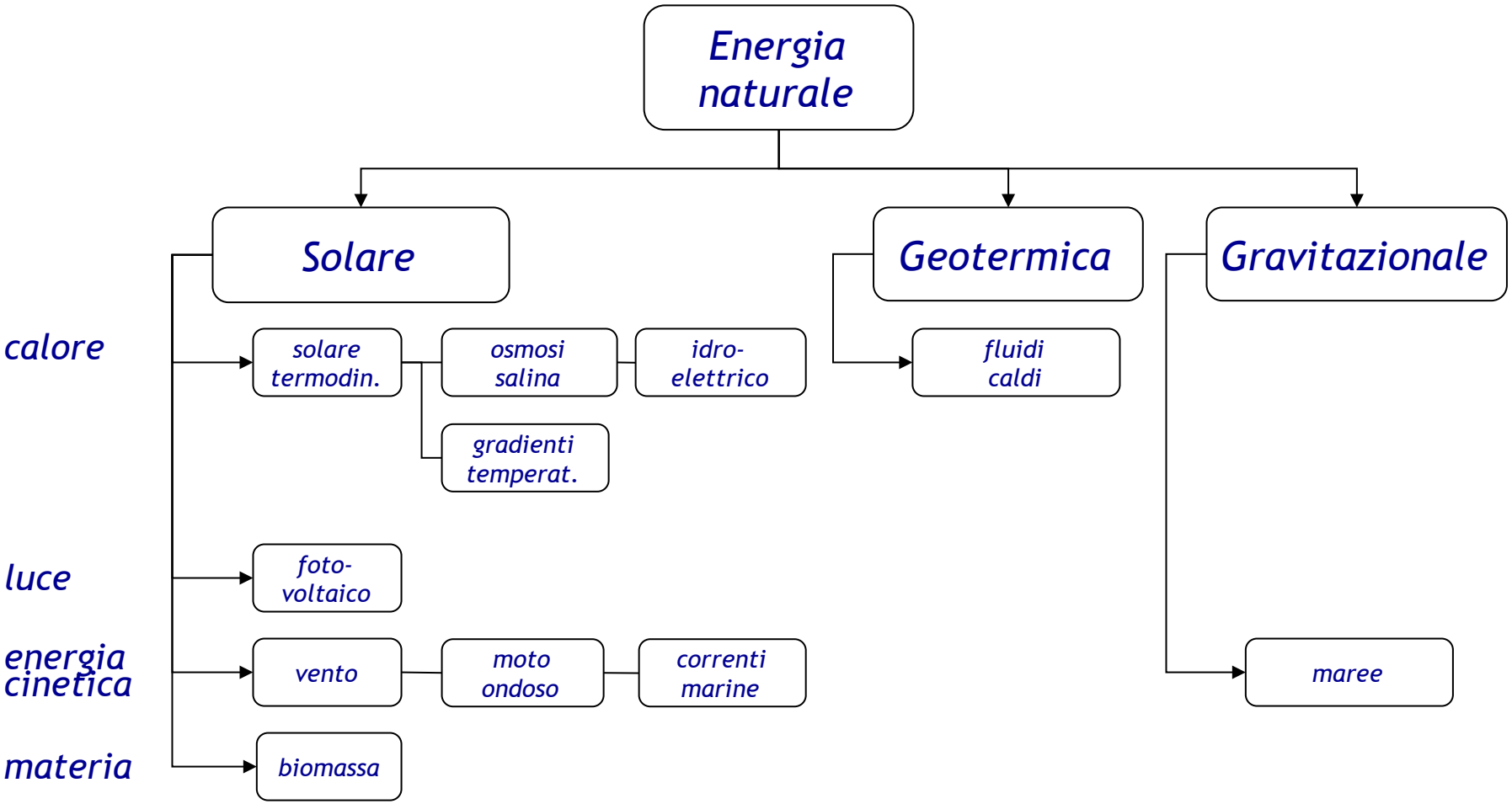



Gravitazione

Sole

Radioattività

# Quadro generale

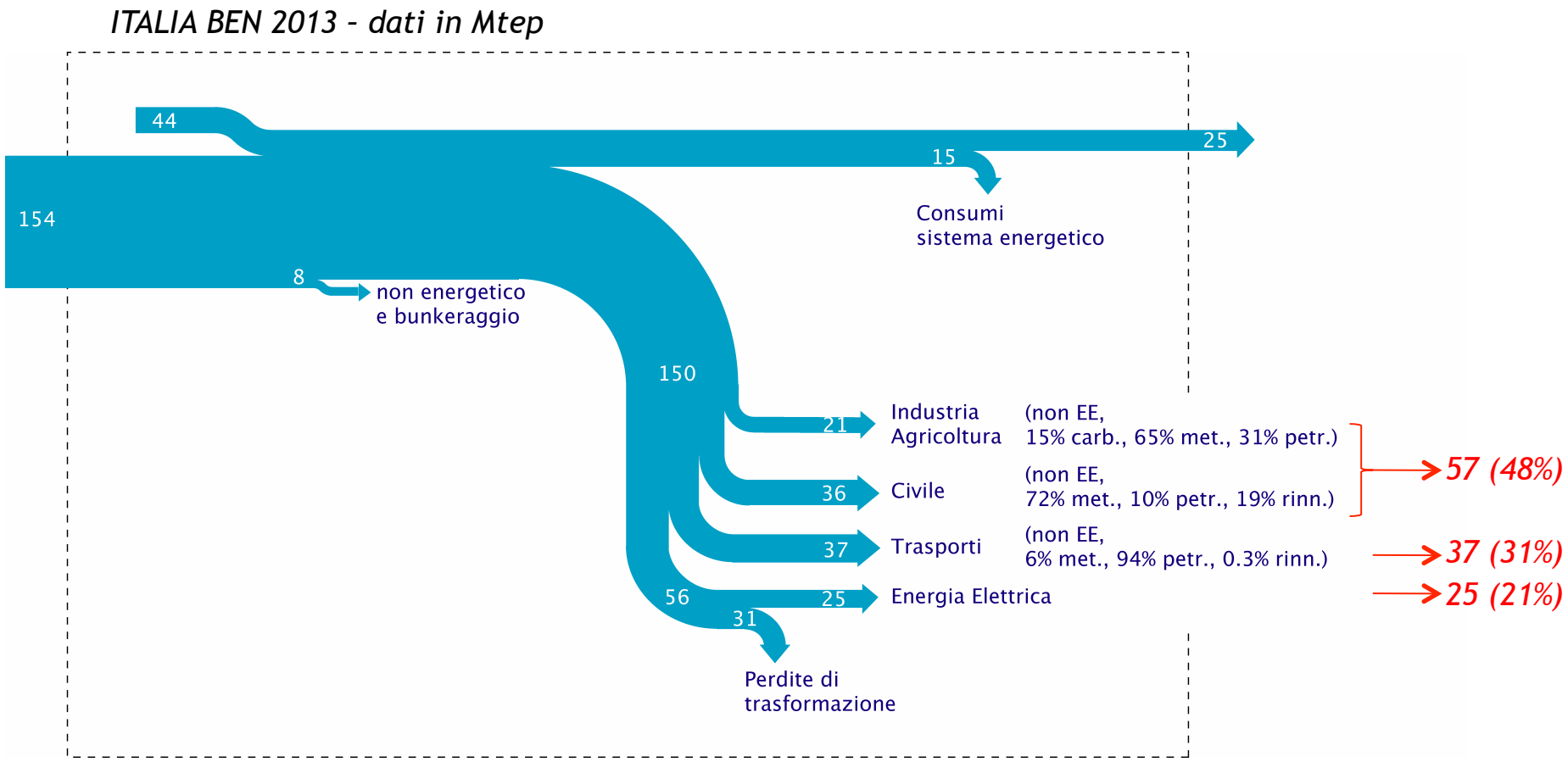


# Italia - Bilancio Energetico Nazionale (2013)

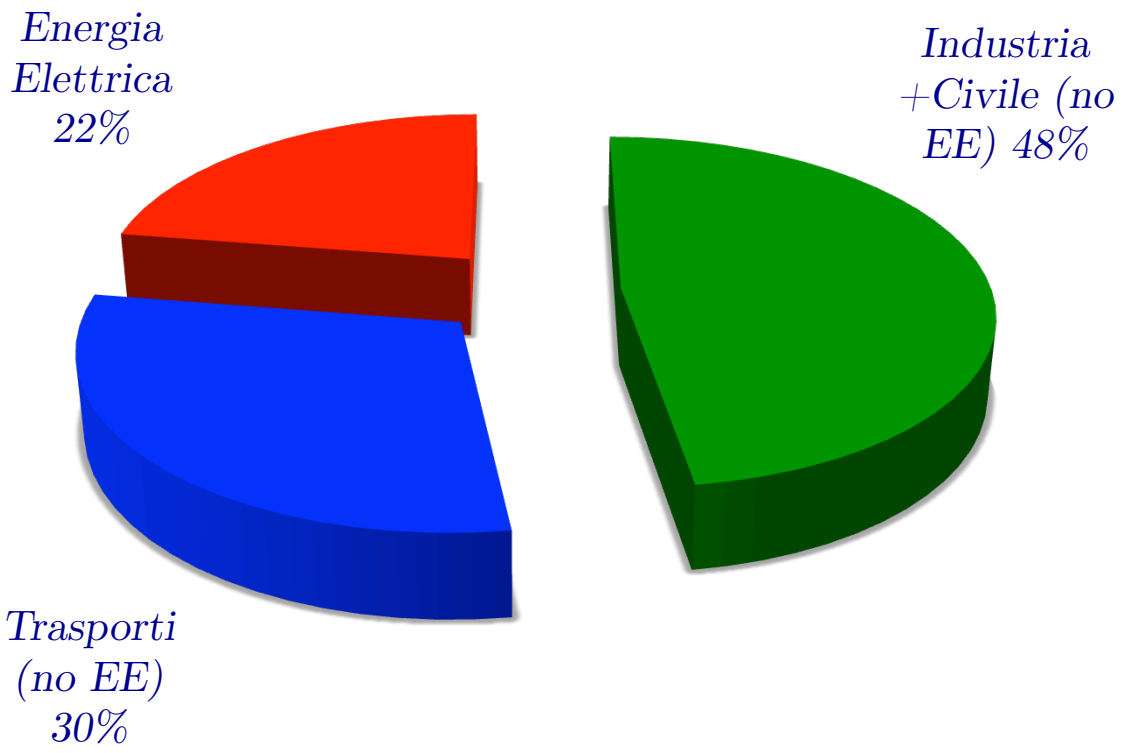
| Valori in Mtep | Solidi | Gas Naturale | Petrolio | Rinnovabili | EE | Totale |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Produzione | 0.357 | 6.336 | 5.502 | 31.626 | | 43.821 |
| 2. Importazione | 13.485 | 50.756 | 77.815 | 2.304 | 9.754 | 154.114 |
| 3. Esportazione | 0.173 | 0.187 | 24.060 | 0.052 | 0.484 | 24.956 |
| 4. Variaz. scorte | -0.494 | -0.488 | 0.914 | 0.053 | | -0.015 |
| 5. Consumo interno lordo (1+2-3-4) | 14.163 | 57.393 | 58.343 | 33.825 | 9.270 | 172.994 |
| 6. Consumi e perdite del settore energ. | -0.142 | -1.533 | -3.822 | -0.013 | -40.897 | -46.407 |
| 7. Trasformazioni in energia elettr. | -11.090 | -16.876 | -2.476 | -25.901 | 56.343 | |
| 8. Totale impieghi finali (5+6+7) | 2.931 | 38.984 | 52.045 | 7.911 | 24.716 | 126.587 |
| - industria | 2.856 | 12.130 | 3.788 | 0.034 | 9.367 | 28.175 |
| - trasporti | | 0.812 | 34.897 | 1.188 | 0.926 | 37.823 |
| - Civile | 0.003 | 25.463 | 3.427 | 6.682 | 13.935 | 49.510 |
| - Agricoltura | | 0.129 | 2.112 | 0.007 | 0.488 | 2.736 |
| - usi non energetici | 0.072 | 0.450 | 5.390 | 0.000 | | 5.912 |
| - bunkeraggi | | | 2.431 | | | 2.431 |

Fonte: Bilancio Energetico Nazionale 2013

# Italia - Bilancio Energetico Nazionale (2013)



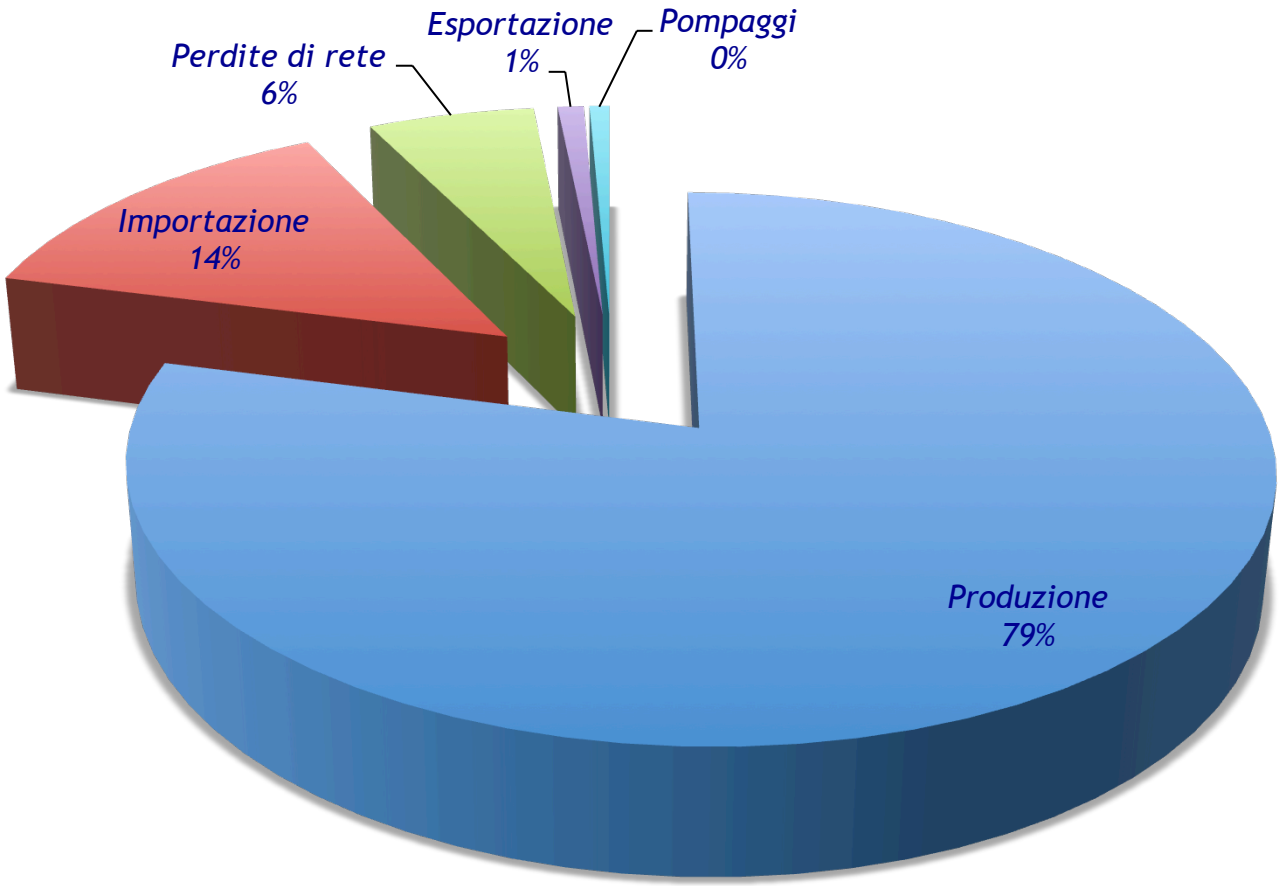
# Consumi finali nel mondo



# Tre settori, circa equivalenti

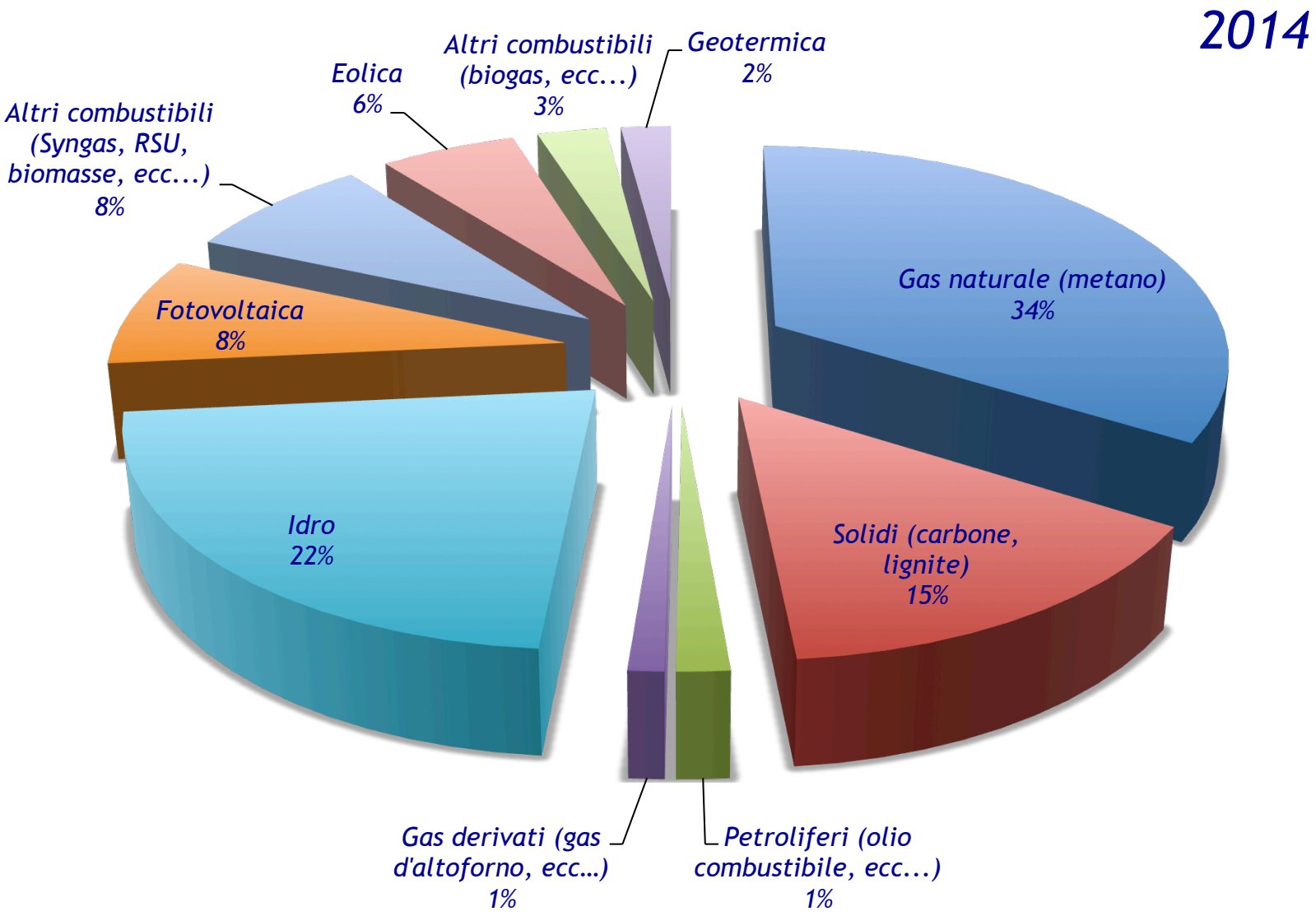
| | fonte | | ubicazione | |
|---|---|---|---|---|
| | fissa | mobile | centralizzata | distribuita |
| Riscaldamento domestico | X | | | X |
| Trasporti | | X | | X |
| Energia elettrica | X | | X | |

# Energia elettrica - Italia




2014

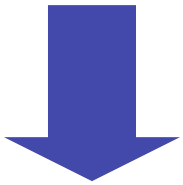
# Energia elettrica – produzione - Italia



# *Approccio integrato*

*Sistema che garantisca la copertura di tutte e tre le tipologie di consumo:*

- *energia elettrica*
- *trasporti*
- *riscaldamento*



- *generazione di elettricità da energia solare*
- *generazione di combustibile per autotrasporto tramite elettricità*
- *utilizzo di pompe di calore (usando elettricità centralizzata o locale) per il riscaldamento*

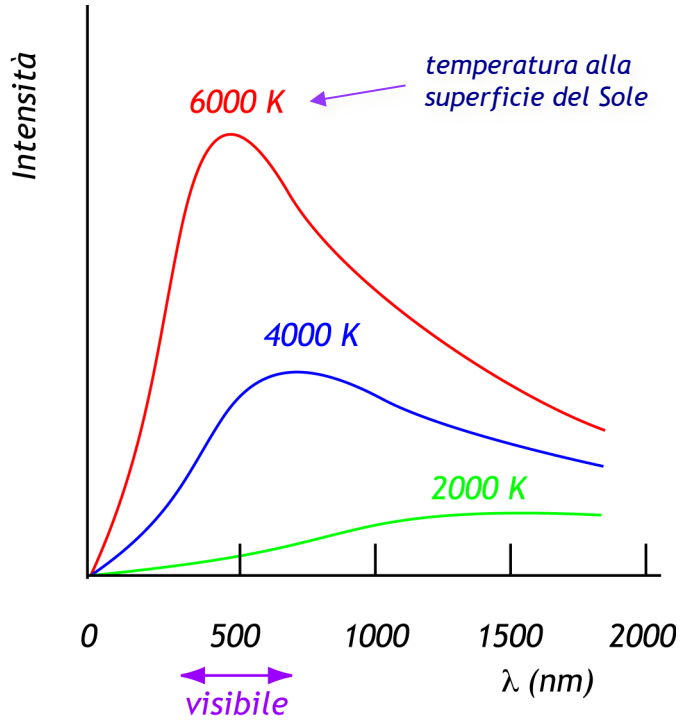
# Generazione di elettricità da energia solare

*Termodinamico*

*Fotovoltaico*

# Radiazione da un corpo caldo

*Emissione di onde elettromagnetiche da parte di un corpo riscaldato:*

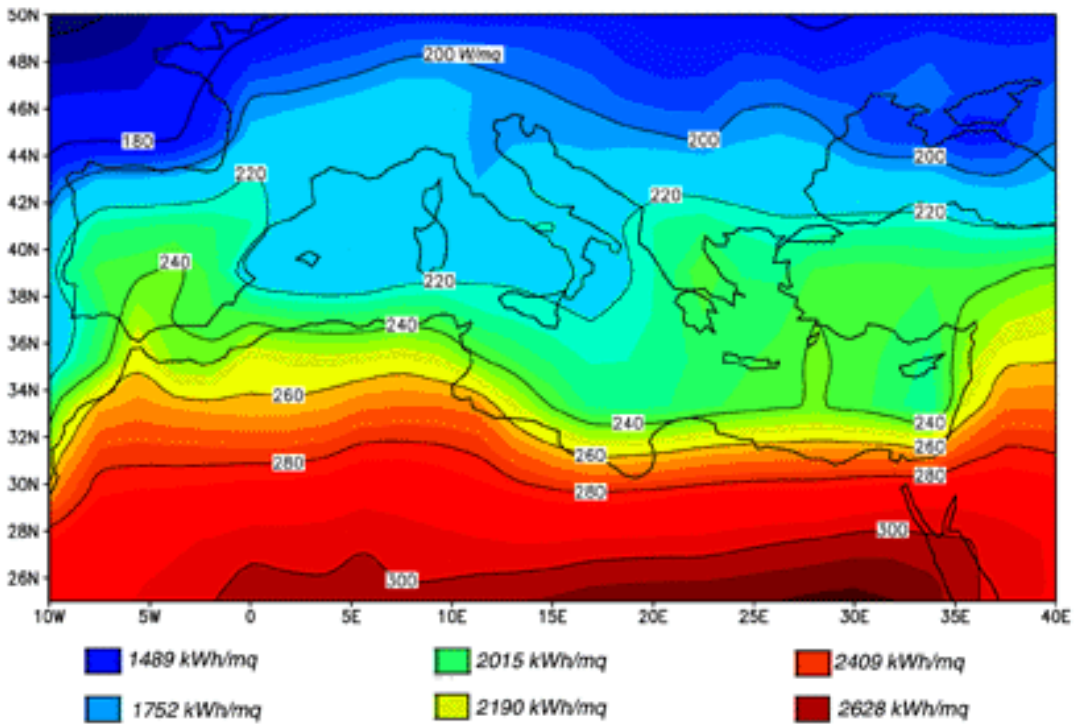



*A basse temperature le radiazione emesse si trovano ad alte lunghezze d'onda (infrarosso). Al crescere della temperatura l'oggetto comincia a diventare rosso. A temperature sufficientemente elevate diventa bianco (come il filamento di una lampadina).*

*In realtà la radiazione termica è un continuo di lunghezze d'onda che si estende dalle regioni dell'infrarosso, a quelle visibili e ultraviolette dello spettro, e la lunghezza d'onda dell'emissione massima dipende dalla temperatura.*

*Legge dello spostamento di Wien:* $\lambda_{max}\, T = 0.2898 \times 10^{-2}$ m K

# Termoelettrico solare




- *Radiazione solare diretta: apertura angolare: 1°*
- *Temperatura massima teorica (con concentratori): superficie del sole (5000 °C)*
- *Energia annua raccolta: 2000 kWh/m$^2$ = 1,5 barili di petroli/m$^2$*

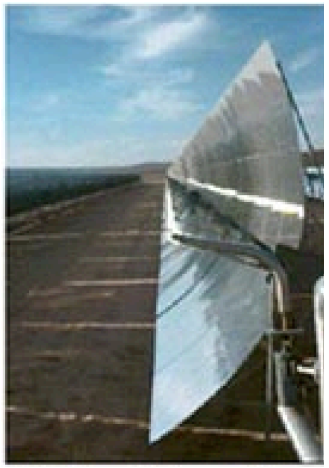
*Massimo flusso di energia in Italia: ~1 kW/m$^2$*

# *Collettori solari termici ad alta temperatura*

- *Specchi parabolici lineari*
- *Torri solari*
- *Concentratori parabolici independenti*

# Specchi parabolici lineari

*Denominati con il termine SEGS, essi sono usati per focalizzare su un singolo asse i raggi solari su un lungo tubo ricevente posizionato lungo la linea focale dei concentratori.*



*Un mezzo portatore di calore, ad esempio olio, pompato attraverso i tubi ricettori, alimenta una stazione di potenza localizzata centralmente.*
*Il calore solare è trasformato in vapore allo scopo di far funzionare un turbogeneratore elettrico.*
*La temperatura tipica di operazione è di 350°C.*

*Tali impianti oggi hanno potenze tipiche dell'ordine di 30-80 MW (anche se l'impianto più grande - Solana Generating Station in Arizona è da 280 MW) bruciano anche una certa quantità di combustibile fossile (gas naturale) per produrre energia quando l'energia solare è deficitaria.*

# Torri solari

*Un sistema di specchi che inseguono il moto del sole su doppio asse, chiamati eliostati, riflettono l'energia solare su di un recettore montato in cima ad una torre localizzata al centro.*
*Il calore solare è raccolto da un fluido, ad esempio un nitrato fuso, che ha anche la funzione di accumulo di energia .*
*Con il calore accumulato nei sali fusi si produce del vapore (565°C), allo scopo di fare girare un turbogeneratore elettrico.*
*Le torri solari sono particolarmente adatte alla produzione centralizzata di energia fino a 400 MW elettrici.*

Ivanpah Dry Lake, CA

# Concentratori parabolici indipendenti

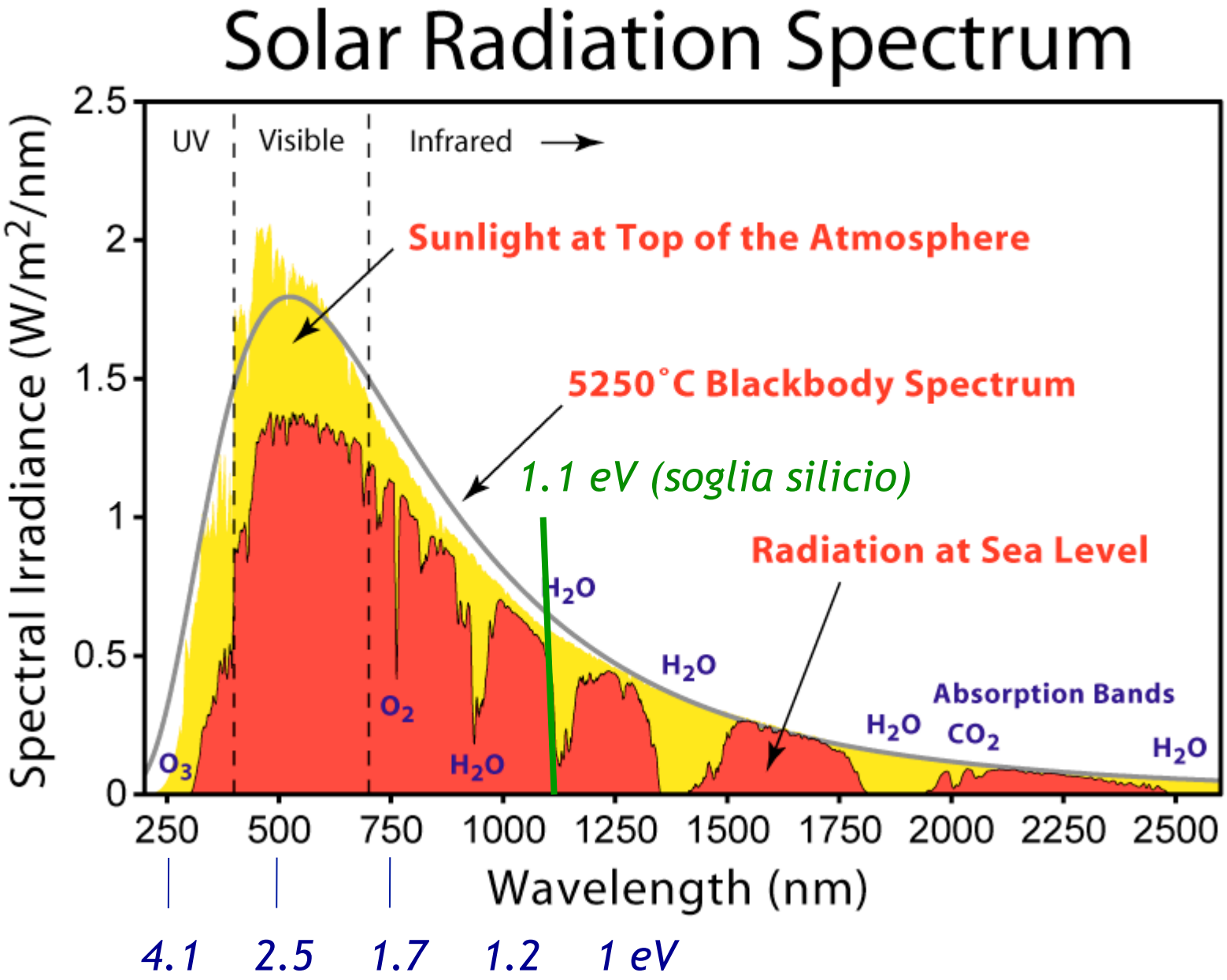
*Consistono in uno specchio parabolico mobile per seguire il moto del sole e riflettente i raggi solari nel punto focale, dove sono assorbiti dal ricevitore.*
*Il calore assorbito è trasferito (a 750°C) da un sistema fluido-vapore (ad esempio sodio) al motore-generatore, ad esempio un motore lineare tipo Stirling, quantunque altri metodi (Brayton) siano anche utilizzati.*
*Le dimensioni dei singoli moduli possono variare nell'intervallo da 5 a 50 kW elettrici; con una serie di tali concentratori si possono realizzare impianti di qualsiasi taglia e potenza. Il calore può eventualmente essere raccolto attraverso guide di calore (heat-pipes) presso una stazione di potenza localizzata centralmente.*

# *Gestione delle fluttuazioni nella produzione di energia*

*Accumulo dell'energia termica:*
*il fluido viene mantenuto caldo permettendo di mantenere l'impianto operativo durante le ore notturne.*

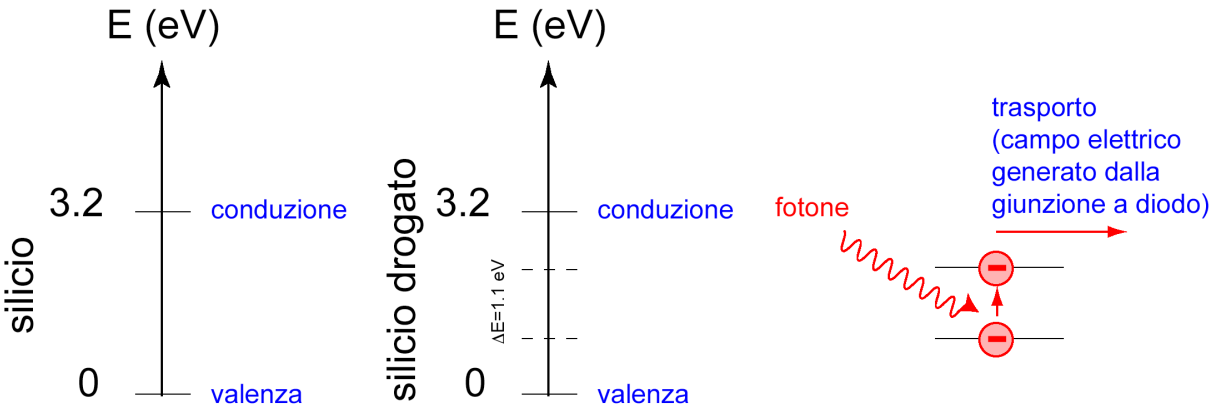
*Operazione congiunta solare-fossile:*
*durante i periodi prolungati di assenza di calore solare, l'energia mancante è prodotta con combustibili fossili.*

# Fotovoltaico (principi)



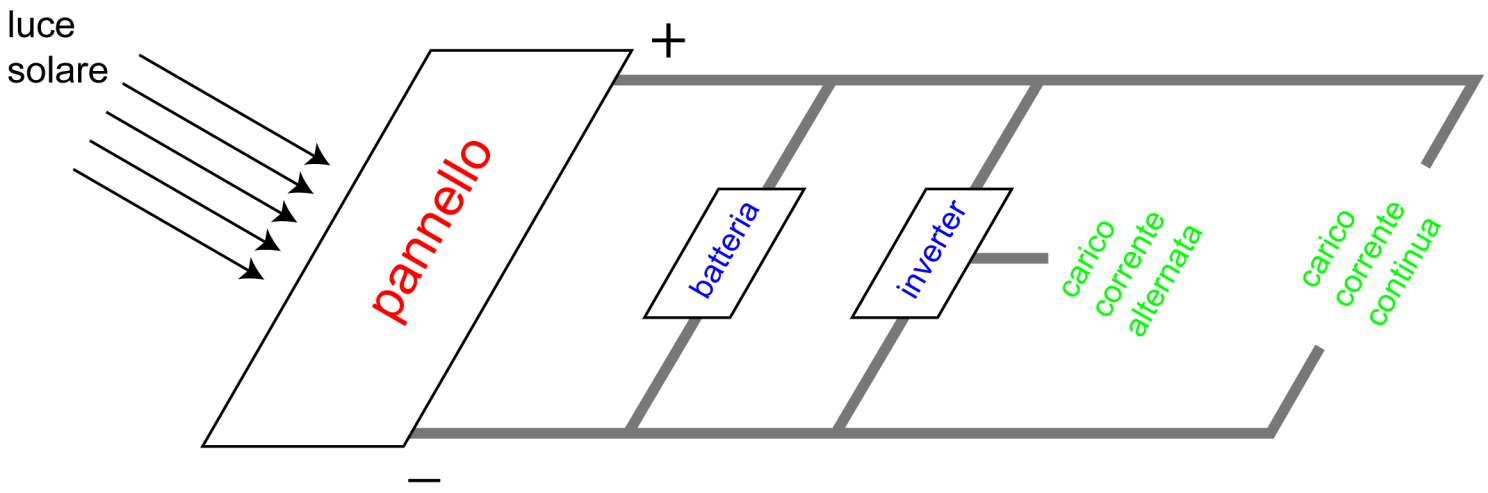
# Fotovoltaico (principi)

*Il silicio cristallino è un semiconduttore in cui la differenza di energia tra banda di valenza e banda di conduzione è di 3.2 eV. Sostituendo alcuni atomi di silicio (quadrivalente) con atomi trivalenti o pentavalenti si abbassa la differenza tra le bande fino a 1.1 eV*
*La luce visibile viene assorbita dal cristallo che libera elettroni nella banda di conduzione. Questi elettroni sono liberi di muoversi e possono quindi essere raccolti per mezzo dei campi elettrici che si creano alla giunzione di uno strato di silicio drogato con atomi pentavalenti e uno strato drogato con atomi trivalenti.*




*E = hν = hc/λ -> λ = (1240 eV nm)/(3.2 eV) = 387 nm*
*E = hν = hc/λ -> λ = (1240 eV nm)/(1.1 eV) = 1100 nm*

# Fotovoltaico

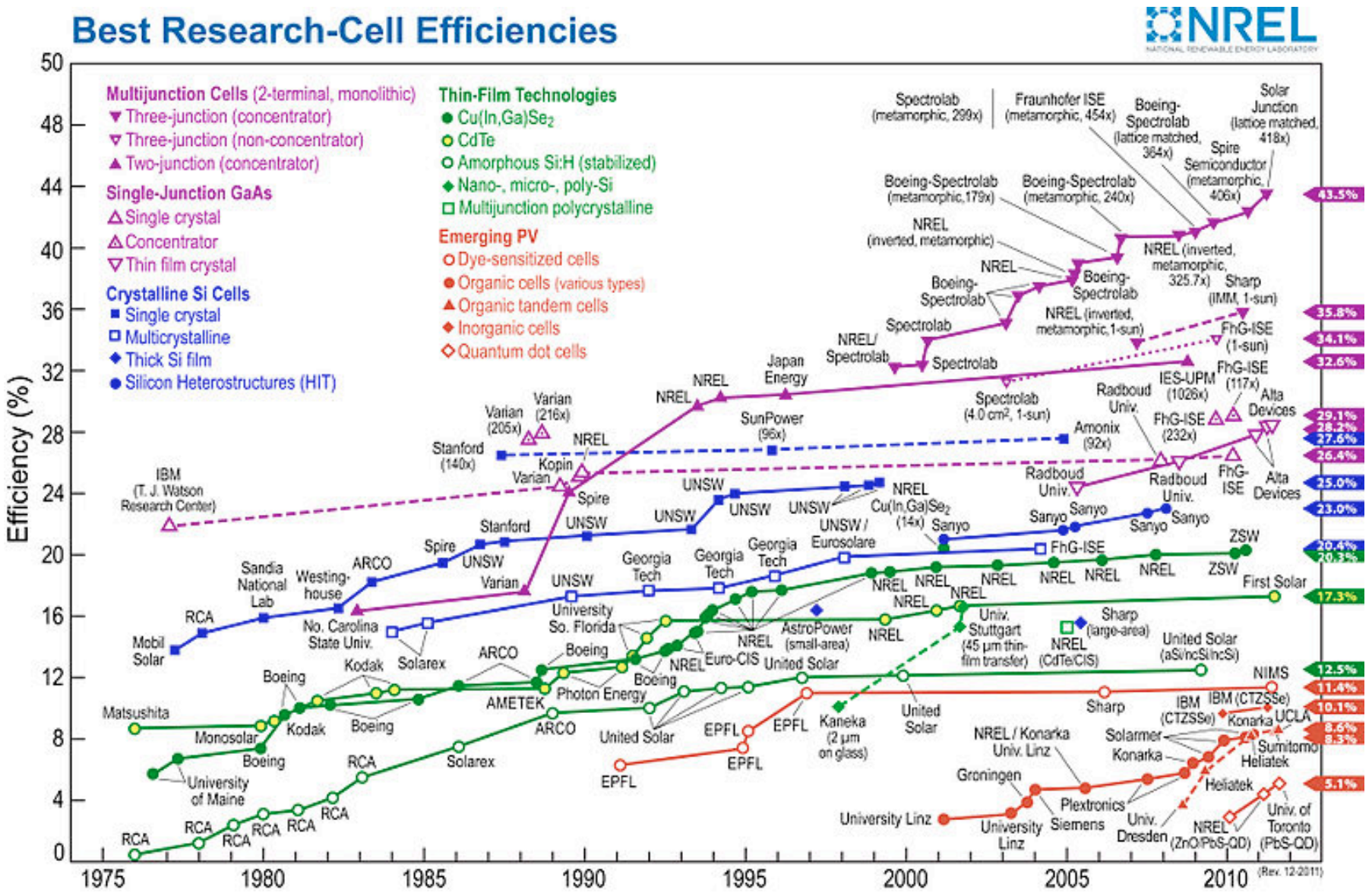



*"Tipica" cella fotovoltaica:*
*spessore complessivo: 0,25 ÷ 0,35 mm*
*superficie: 100 ÷ 225 $cm^2$*
*corrente prodotta: 3 ÷ 4 A a 0,5 V con irraggiamento di 1 $kW/m^2$ a t=25°C (P=1,5 ÷ 2 W)*

*Efficienza per celle commerciali: 13÷17%*

*La gestione delle fluttuazioni di potenza si realizza con batterie accumulatrici.*

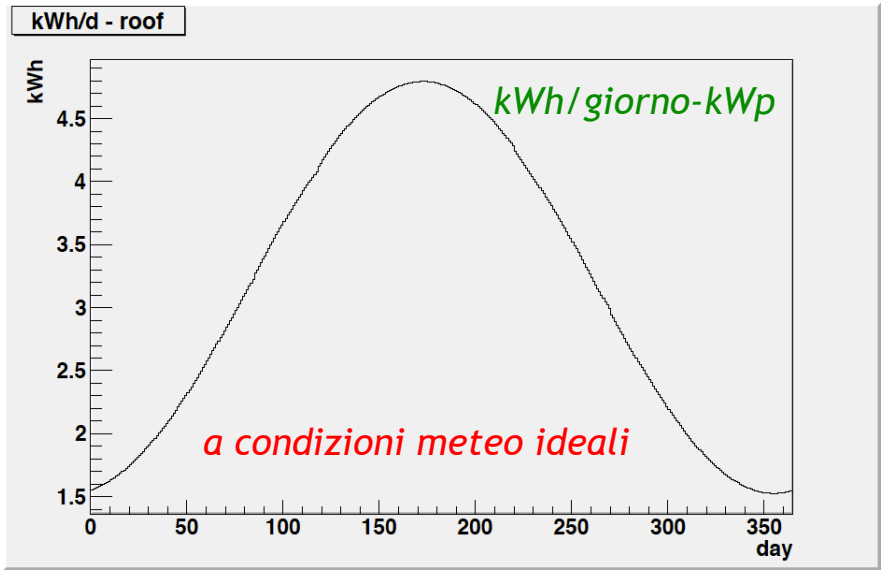
# *Efficienza delle celle fotovoltaiche*



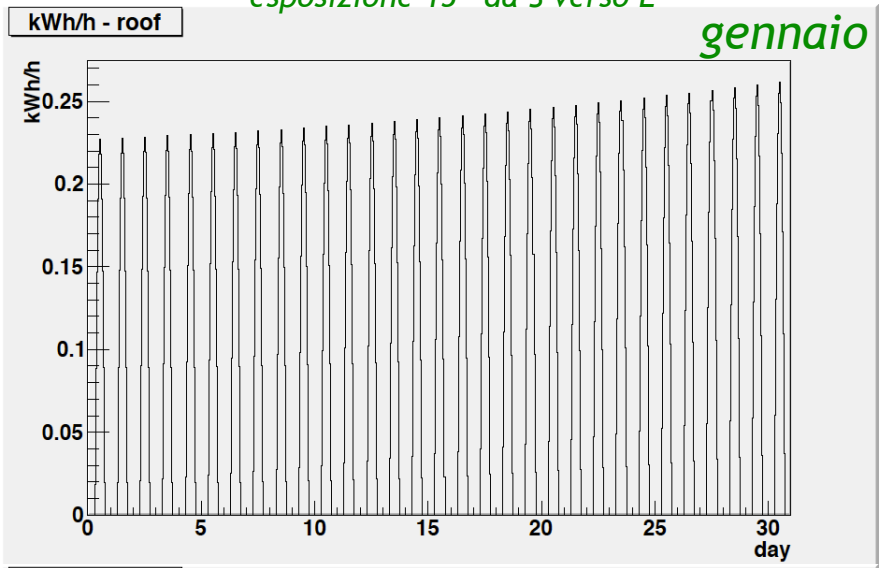
# Calcolo dell'energia ricavabile

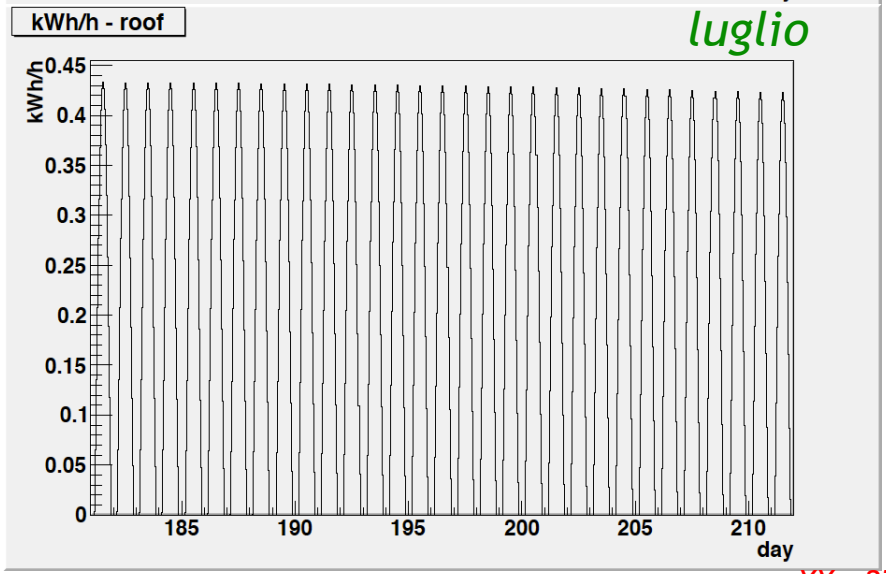
*L'energia ricavabile da un sistema a celle fotovoltaiche dipende dall'insolazione e dall'angolazione delle celle rispetto al sole, integrata sull'anno.*

*Fattori di cui tener conto:*
- *latitudine (direzione dello zenit)*
- *inclinazione e orientamento delle celle rispetto allo zenit*
- *giorno dell'anno:*
  - *inclinazione dell'asse terrestre*
  - *distanza dal sole*
- *ora del giorno*



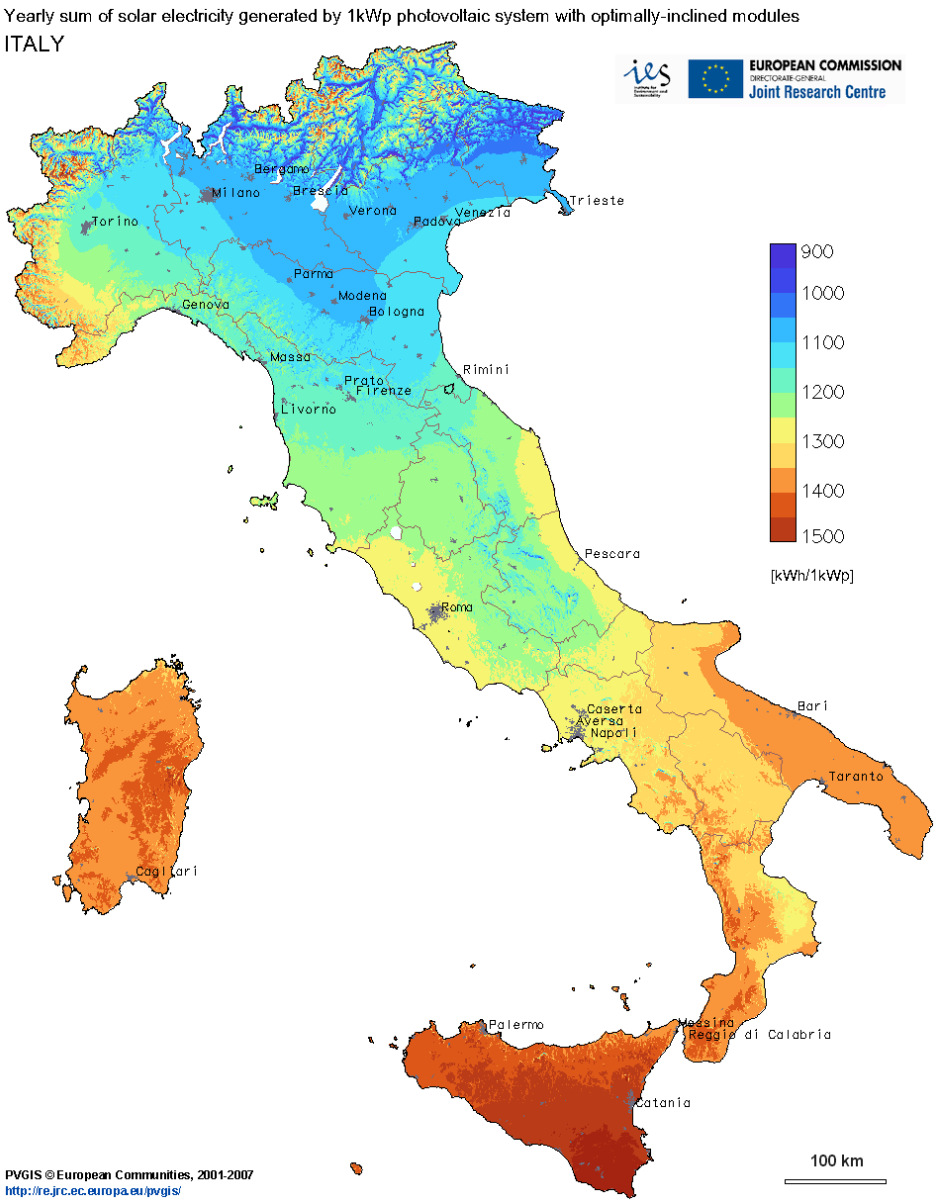

*kWh/h per kWp installato*
*latitudine 45°, tetto a 30°,*
*esposizione 15° da S verso E*




*Referenza: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm*

# Energia ricavabile




*1 kW corrisponde teoricamente a 8760 kWh/anno*

*In realtà 1 kWp di fotovoltaico produce 1100 kWh/anno a Ravenna. Cioè è equivalente ad una centrale termoelettrica di potenza installata = 1100/8760 = 126 W*

*In altri termini, la potenza di 18 GWp installata fino al 2013 in Italia, corrisponde a due centrali tradizionali da 1.1 GW e non a sedici centrali della stessa potenza.*

# California Valley Solar Ranch

*250 MW picco*
*sistema di movimento per inseguire il sole*

# S. Alberto, Ravenna

*35 MW picco*
*Caseificio integrato*

# *Problema tecnico: potenza intermittente*

*potenza massima immissibile in rete limitata*
*limite attuale: 15%*

*potenza intermittente ➟ potenza media = 12% della potenza di picco*

⬇

*l'energia immissibile è il 15% x 12% = 1,8% del totale*

*Aumentando la potenza immissibile al 50%, l'energia immissibile è il 6% del totale.*

⬇

*a fronte di una disponibilità sovrabbondante il beneficio ambientale è irrilevante senza un sistema per diminuire la potenza di picco (stoccaggio del calore o dell'elettricità)*

# … riassumendo …

| | | |
|---|---|---|
| Energia solare incidente in un anno (1500 kWh/m$^2$ anno) | | 40.000 Mtep |
| Vincoli geomorfologici | 40% | 16.000 Mtep |
| Limiti di conflittualità territoriale | 20% | 3.200 Mtep |
| Efficienza | 12% | 380 Mtep |

potenziale praticabile
solo con storage

# Come superare il limiti

- *miglioramento dell'efficienza*
  - ➟ *ricerca*
- *promozione della domanda*
  - ➟ *economia di scala*
- *riconoscimento dei benefici ambientali*
  - ➟ *certificazione delle esternalità*
- *eliminazione dell'intermittenza a breve termine*
  - ➟ *sistemi di accumulo del calore*
- *eliminazione dell'intermittenza a lungo termine*
  - ➟ *trasformazione dell'energia elettrica in energia chimica da impiegare in altri usi energetici (produzione di idrogeno)*

# Idrogeno

## Potere calorifico

| | kWh/kg | kWh/m$^3$ | kWh/litro |
|---|---|---|---|
| IDROGENO<br>Gas<br>Liquido | 12,5 x 10$^4$ | 3,0 | <br><br>2,4 |
| BENZINA | 4,5 x 10$^4$ | | 9,0 |
| GAS NATURALE | 4,8 x 10$^4$ | 10,4 | |

*Attualmente l'idrogeno è prodotto in grandissime quantità (4,2 x 10$^{10}$ kg/anno) per la sintesi dell'ammonica per fertilizzanti chimici, estraendolo dal metano ("reforming") ➟ produzione di $CO_2$ equivalente ad 1/4 di quella prodotta dal consumo di combustibili fossili in Italia.*

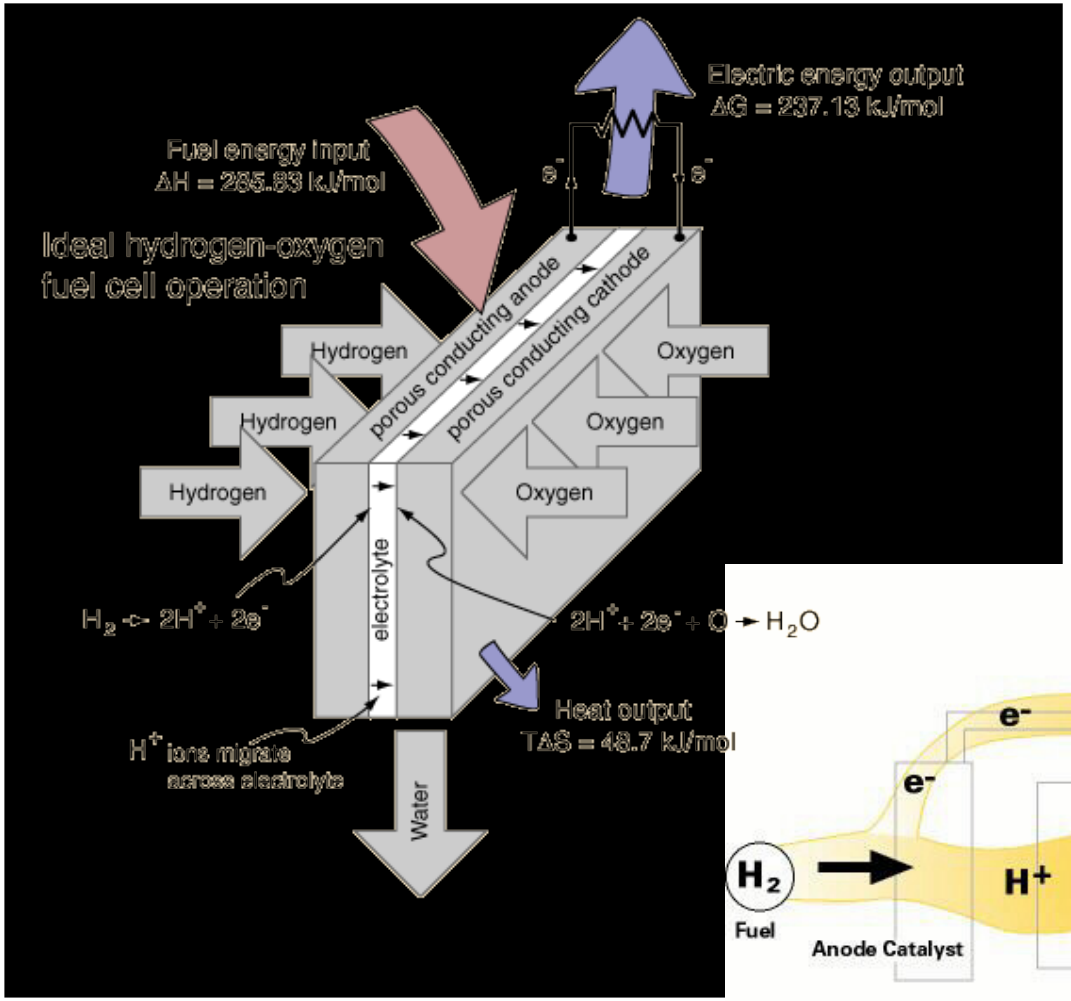
*Ma l'idrogeno può essere prodotto per idrolisi usando energia elettrica.*

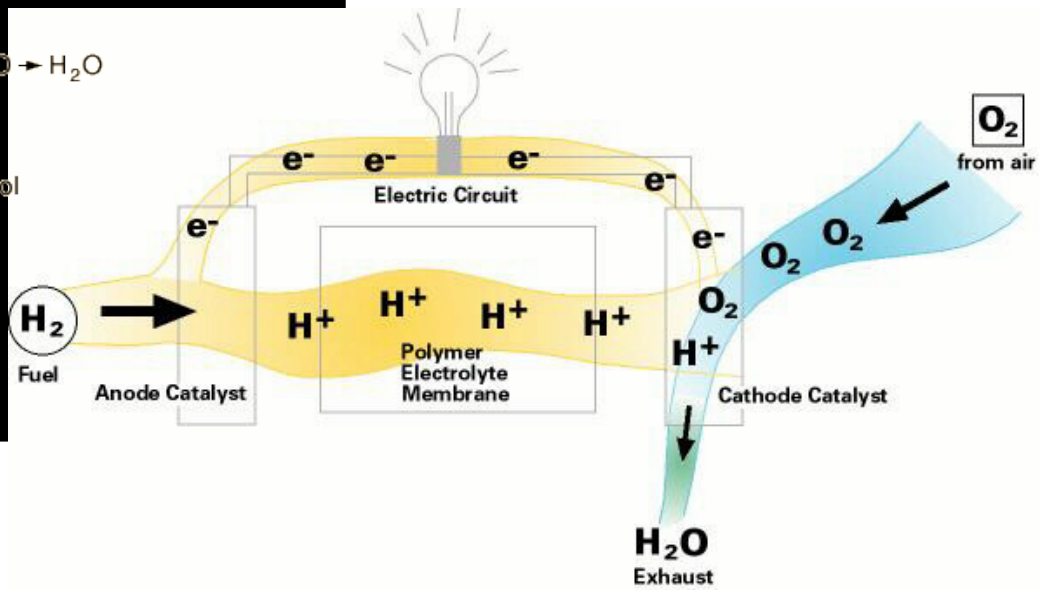
# *Generazione di energia dall'idrogeno*

- *Calore ➡ combustione ➡ efficienza = 40%*
- *Elettricità ➡ cella a combustibile ➡ efficienza = 83%*

*Il prodotto del consumo dell'idrogeno è vapore d'acqua*

# Celle a idrogeno



# Principio di funzionamento

*Combinando una mole di idrogeno molecolare con mezza mole di ossigeno molecolare si produce una mole di acqua.*
*Supponendo che il processo avvenga a T = 298 K e P = 1 atm, i potenziali termodinamici sono i seguenti:*

| *Variabile* | $H_2$ | $0.5\ O_2$ | $H_2O$ | *Variazione* |
|---|---|---|---|---|
| *Entalpia* | *0* | *0* | *-285.83 kJ* | $\Delta H$=-285.83 kJ |
| *Entropia* | *130.68 J/K* | *0.5x205.14 J/K* | *69.91 J/K* | $T\Delta S$=48.7 kJ |

*La variazione in entalpia comprende sia la diminuzione di volume sia l'energia ottenuta combinando gli atomi di idrogeno e ossigeno nella molecola d'acqua.*
*La diminuzione di entropia nel processo di combinazione risulta in una cessione di calore all'ambiente, per cui l'ammontare di energia disponibile per la produzione di energia elettrica risulta di:*

$$E = \Delta H - T\Delta S = -285.83\ kJ + 48.7\ kJ = -237.1\ kJ$$

*Nel caso ideale descritto, l'efficienza di conversione di energia è quindi di:*

$$237.1/285.8 = 83\%$$

# Celle a combustibile – efficienza teorica

*Combinando una mole di idrogeno molecolare con mezza mole di ossigeno molecolare si produce una mole di acqua.*
*Supponendo che il processo avvenga a T = 298 K e P = 1 atm, i potenziali termodinamici sono i seguenti:*

| Variabile | $H_2$ | 0.5 $O_2$ | $H_2O$ | Variazione |
|---|---|---|---|---|
| Entalpia | 0 | 0 | -285.83 kJ | $\Delta H$=-285.83 kJ |
| Entropia | 130.68 J/K | 0.5x205.14 J/K | 69.91 J/K | $T\Delta S$=48.7 kJ |

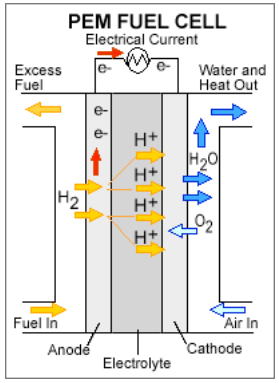
*La variazione in entalpia comprende sia la diminuzione di volume sia l'energia ottenuta combinando gli atomi di idrogeno e ossigeno nella molecola d'acqua.*
*La diminuzione di entropia nel processo di combinazione risulta in una cessione di calore all'ambiente, per cui l'ammontare di energia disponibile per la produzione di energia elettrica risulta di:*

$$E = DH - TDS = -285.83\ kJ + 48.7\ kJ = -237.1\ kJ$$

*Nel caso ideale descritto, l'efficienza di conversione di energia è quindi di:*

$$237.1/285.8 = 83\%$$

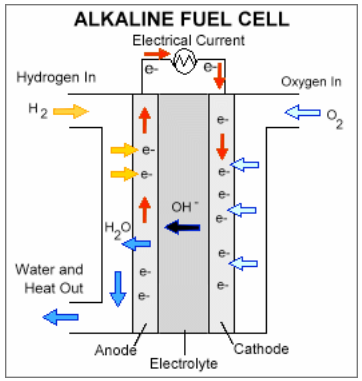
# Celle a combustibile (fuel cells)




## Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells

*(Celle a combustibile con membrana a scambio di protoni)*
*Catalizzatore al platino. Elettrolita: polimero solido. Lavorano a 80°C. Sensibile alla CO*

*si lega al platino*

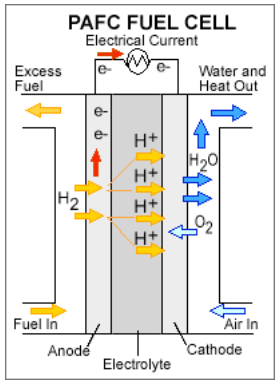



## Alkaline Fuel Cells

*Metalli non preziosi come catalizzatori. Idrossido di potassio (KOH) in acqua come elettrolita. Lavorano a 100÷250°C. Sensibile alla $CO_2$*
*Usate nel programma Apollo e nello Shuttle*

$CO_2 + 2OH^- \longrightarrow CO_3^{2-} + H_2O$
*formazione di carbonati*

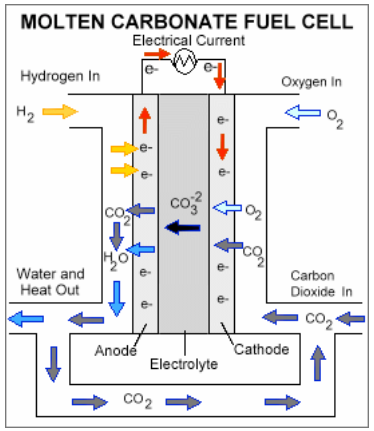
*CATODO:* $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2OH^-$
*ANODO:* $H_2 + 2OH^- \longrightarrow 2H_2O + 2e^-$




## Phosphoric Acid Fuel Cells

*Catalizzatore al platino. Acido fosforico, contenuto in una matrice carboniosa e Teflon, come elettrolita. Lavorano a 150÷220°C. Prime celle commerciali*

# Celle a combustibile (fuel cells)

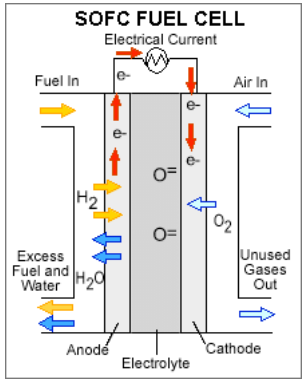



## Molten Carbonate Fuel Cells

*Catalizzatori a metalli non preziosi (grazie all'alta temperatura). Elettrolita composto da sali carbonatici fusi sospesi in un materiale ceramico inerte ($LiAlO_2$). Lavorano a 650°C. Usano $CO_2$ come combustibile (adatte per il syngas). Efficienti grazie all'alta temperatura.*

*ANODO:* $CO_3^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$

*CATODO:* $CO_2 + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$




## Solid Oxide Fuel Cells

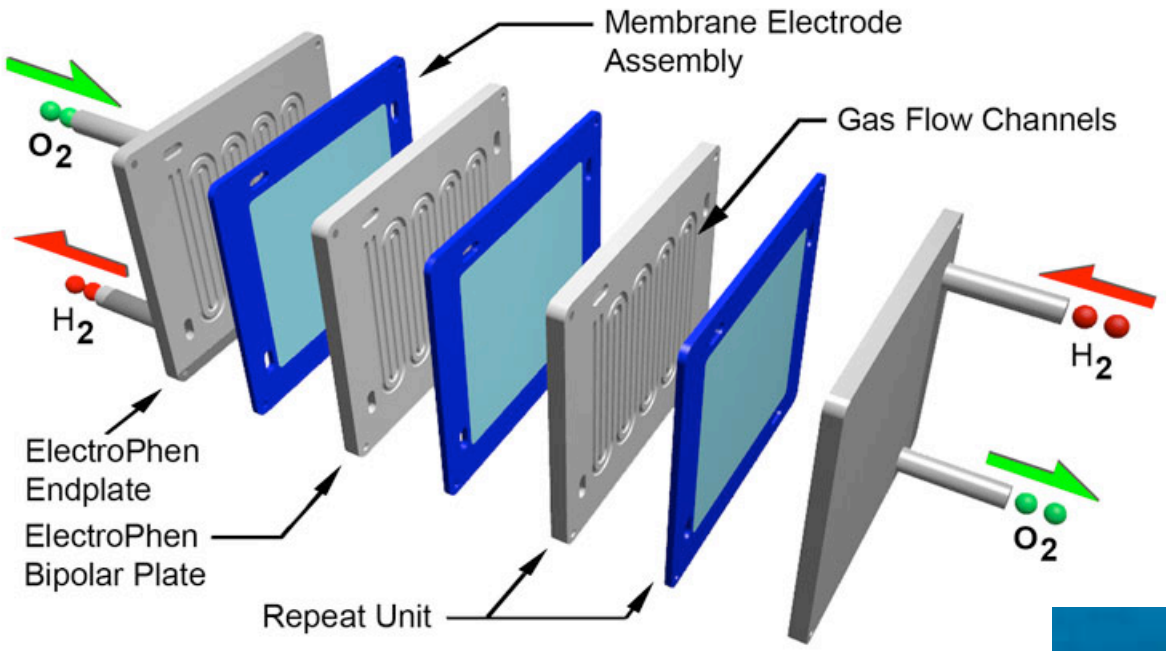
*Catalizzatori a metalli non preziosi (grazie all'alta temperatura). Elettrolita ceramico (ossido di zirconio o ossido di cerio drogato con ittrio). Lavorano a 800÷1000 °C e ad alta pressione. Accoppiabili con turbine.*
*L'idrogeno può essere prodotto da metano per reforming interno.*

*ANODO:* $H_2 + O^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$

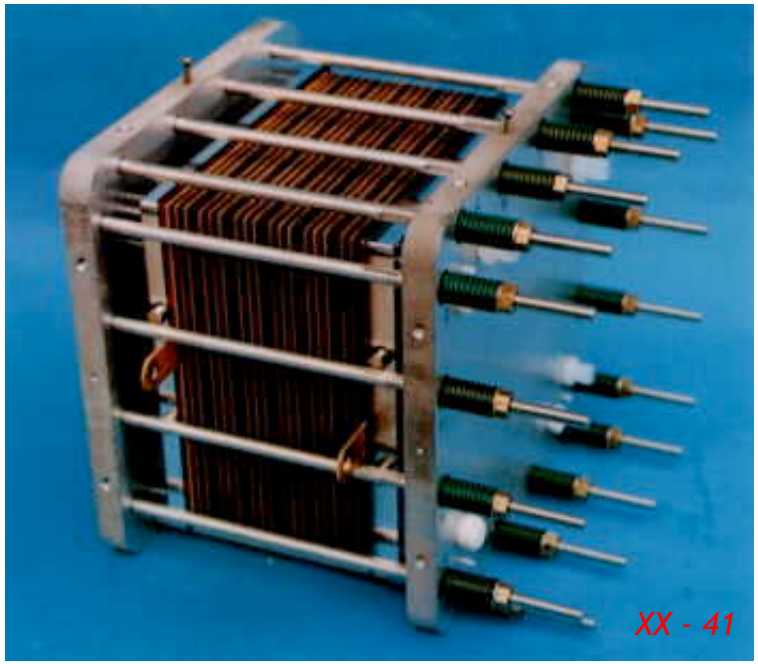
$CO + O^{2-} + H_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$

*CATODO:* $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

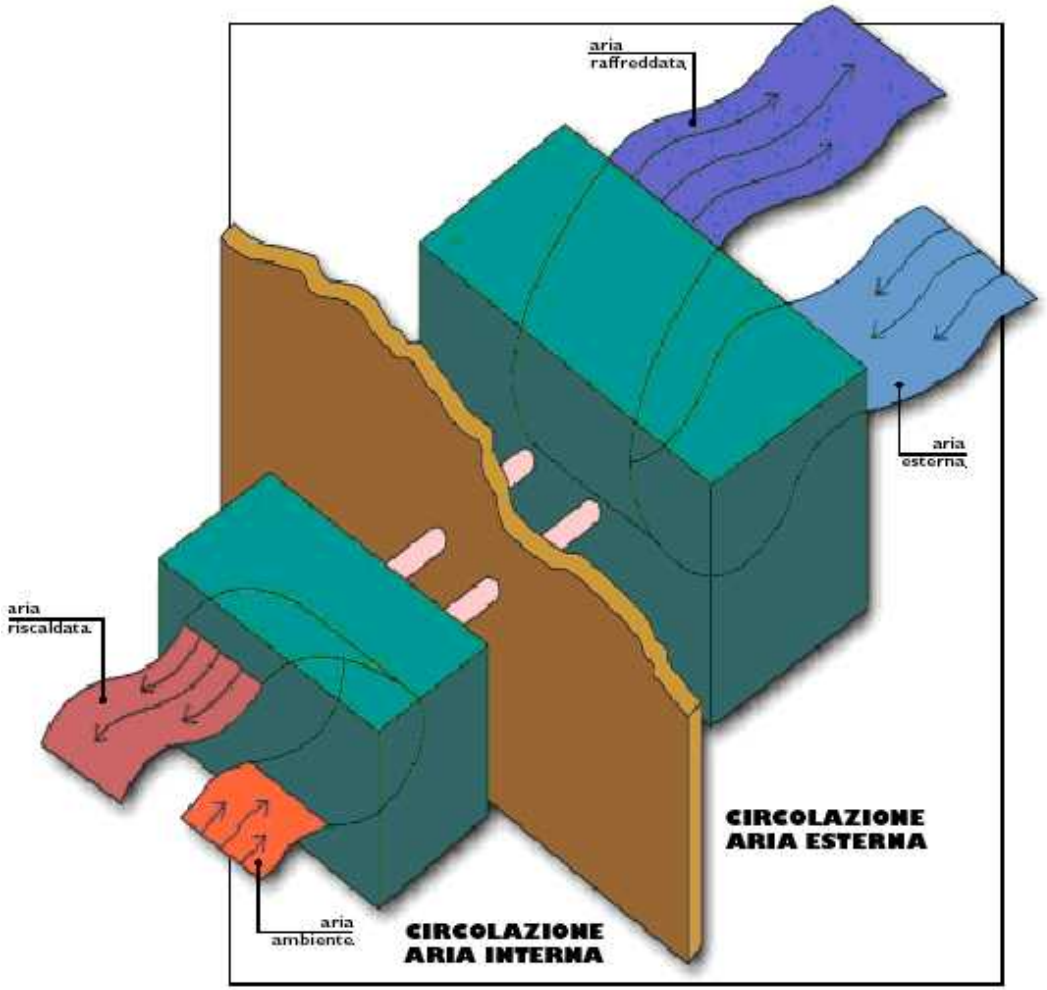
# Celle a combustibile - stack



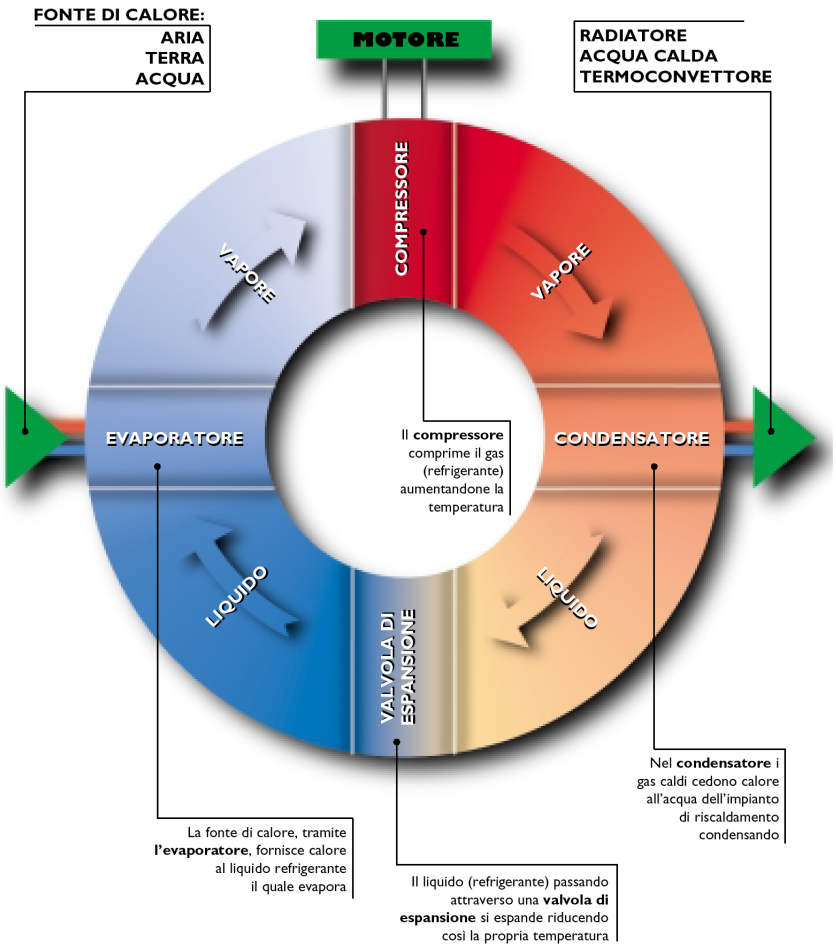

*Le celle a combustibile sono un assemblaggio di molte celle (spessore delle membrane = 50 μm) perchè ciascuna cella produce solo 1 V.*



# Pompe di calore



# Ciclo termodinamico




*Nel corso del suo funzionamento, la pompa di calore:*

*consuma energia elettrica nel compressore*

*assorbe calore nell'evaporatore, dal mezzo circostante, che può essere aria o acqua*

*cede calore al mezzo da riscaldare nel condensatore (aria o acqua).*

# *Efficienza*

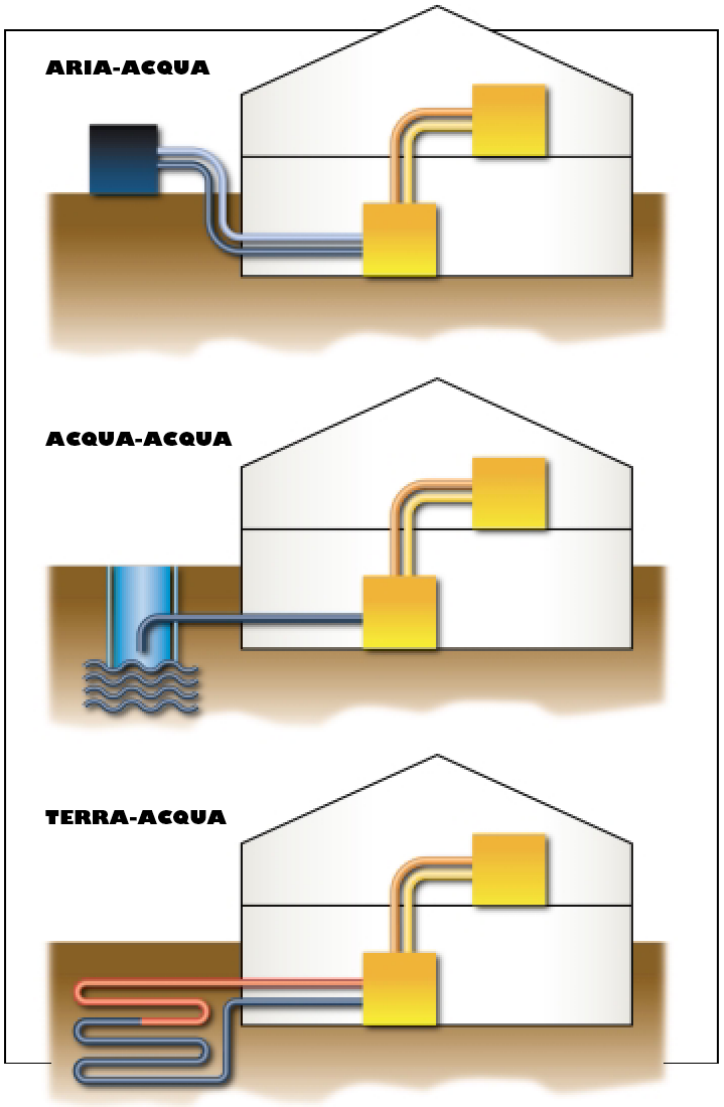
*Il vantaggio nell'uso della pompa di calore deriva dalla sua capacità di fornire più energia (calore) di quella elettrica impiegata per il suo funzionamento in quanto estrae calore dall'ambiente esterno (aria-acqua).*
*L'efficienza di una pompa di calore è misurata dal coefficiente di prestazione "C.O.P." che è il rapporto tra energia fornita (calore ceduto al mezzo da riscaldare) ed energia elettrica consumata.*

*Il C.O.P. è variabile a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento ed ha, in genere, valori prossimi a 3.*
*Questo vuol dire che per 1 kWh di energia elettrica consumato, fornirà 3 kWh (2580 kcal) di calore al mezzo da riscaldare.*

*Il C.O.P. sarà tanto maggiore quanto più bassa è la temperatura a cui il calore viene ceduto (nel condensatore) e quanto più alta quella della sorgente da cui viene assorbito (nell'evaporatore).*

*Al di sotto di una temperatura compresa tra - 2°C e 2°C la pompa di calore si disattiva in quanto le sue prestazioni si ridurrebbero significativamente. Va tenuto conto inoltre che la potenza termica resa dalla pompa di calore dipende dalla temperatura a cui la stessa assorbe calore.*

# Cicli

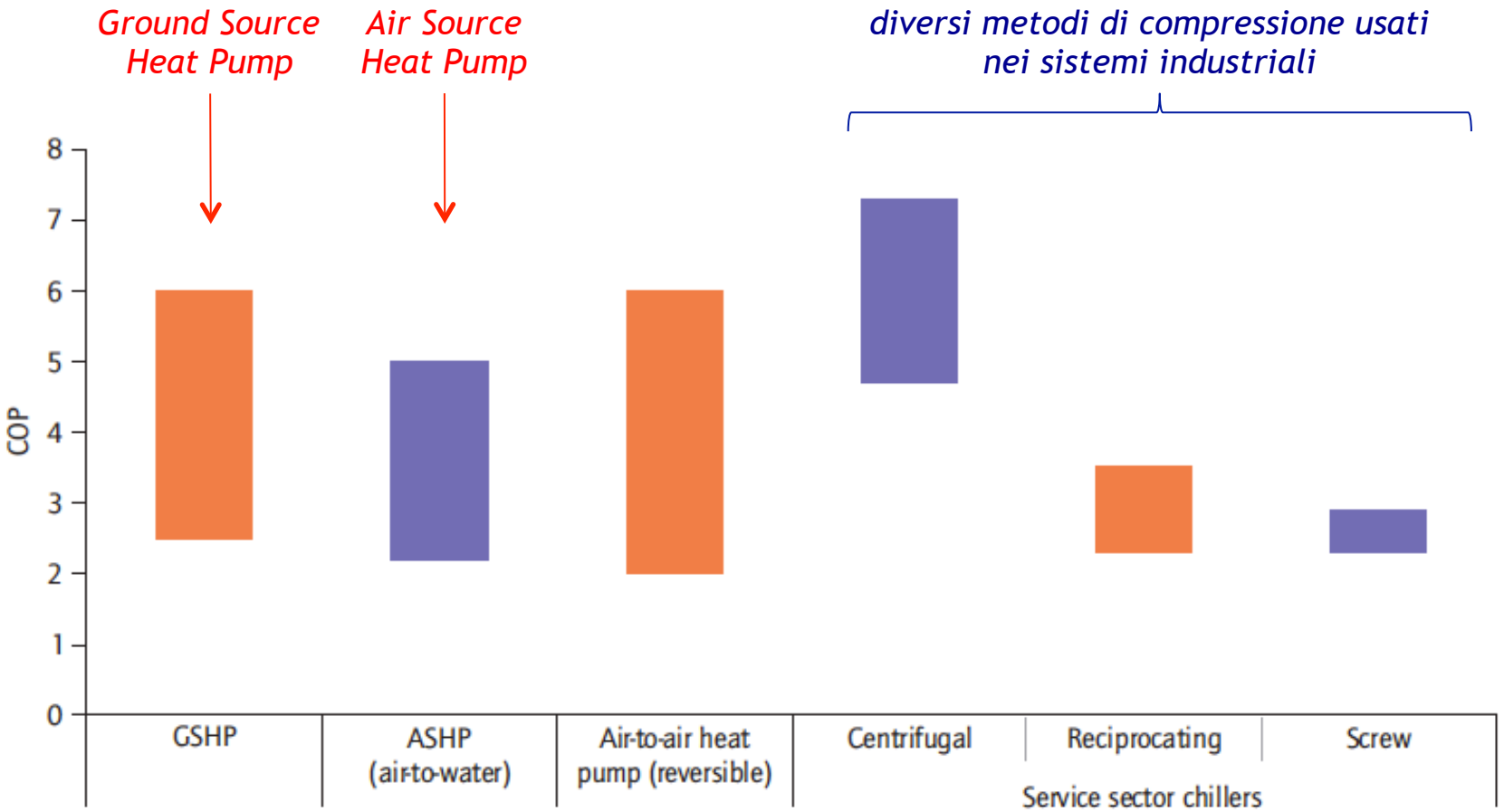



*L'aria* come sorgente fredda ha il vantaggio di essere disponibile ovunque; tuttavia la potenza resa dalla pompa di calore diminuisce con la temperatura della sorgente.

*L'acqua* come sorgente fredda garantisce le prestazioni della pompa di calore senza risentire delle condizioni climatiche esterne; tuttavia richiede un costo addizionale dovuto al sistema di adduzione.

*Il terreno* come sorgente fredda ha il vantaggio di subire minori sbalzi di temperatura rispetto all'aria, ma richiede tubazioni interrate e grandi superfici a disposizione.

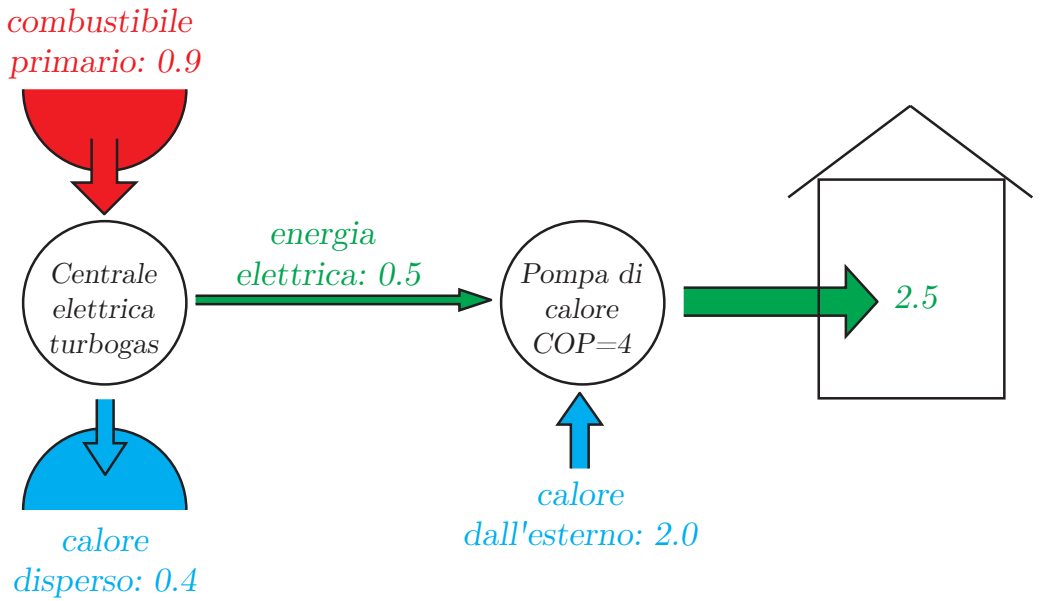
# Pompe di calore - efficienza (COP)



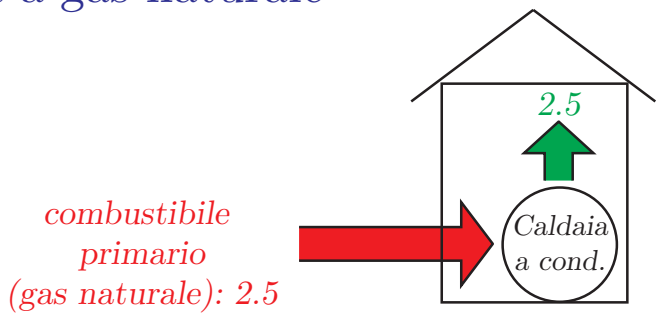

Source: IEA Heat Pump Programme and US DOE/EERE (2009).

# Confronto

## Sistema a pompa di calore




## Caldaia a gas naturale



# Pompe di calore – esempio

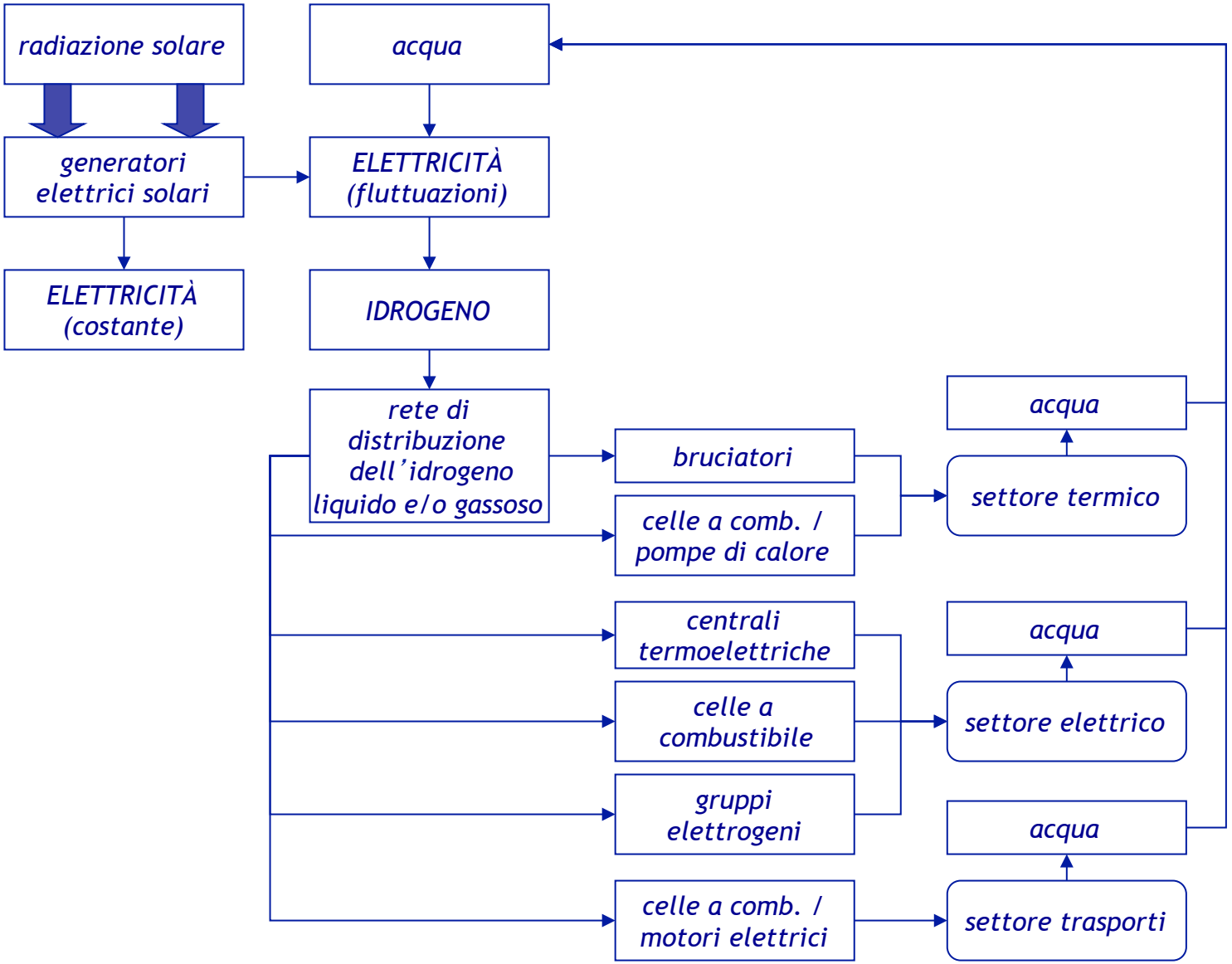
FRIOTHERM

## Värtan Ropsten

***Technical Data***
*6 units*
*Heating capacity per unit 30 MW*
*Power absorbed per unit 8 MW*
*Evaporating temperature -3 °C*
*Condensing temperature +82 °C*
*Sea water temper. in/out +2.5/+0.5 °C*
*Heating water temp. return +57 °C*
*Heating water temp. supply +80 °C*
*Capacity control 10-100 %*

*A Stoccolma non c'è un sistema di distribuzione del gas metano, quindi il riscaldamento domestico è fatto per il 60% con teleriscaldamento e il resto con elettricità o olio combustibile.*

# Economia dell'idrogeno



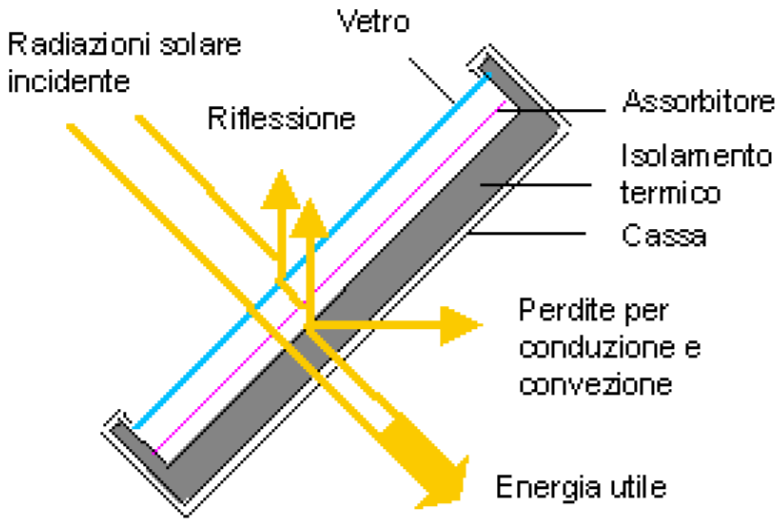
# *Altre energie rinnovabili*

- *Collettori solari a bassa temperatura*
- *Eolico*
- *Biomasse*
- *Nucleare da fusione*

# *Collettore solare termico a bassa temperatura*

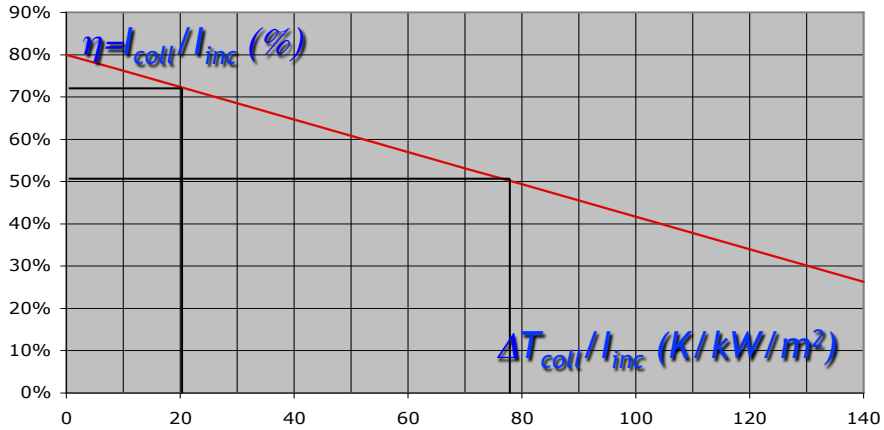
*Elementi:*

- *lastra di vetro che fa passare le radiazioni*
- *Assorbitore - piastra di rame (buon conduttore) in cui sono ricavati molti canali dove circola un fluido (acqua o aria)*
- *isolante termico, che impedisce la dispersione del calore*
- *contenitore che è semplicemente una scatola contenente tutti gli elementi precedenti*




*Il sole scalda la piastra e quindi il fluido che, mediante tubi, viene portato all'esterno fino all'apparecchio utilizzatore (serbatoio di acqua).*

# Un pò di conti …




$I_{inc}$ = intensità solare (~1 kW/m²)
$\tau$ = coefficiente di trasmissione del vetro (~0,9)
$\alpha$ = coefficiente di assorbimento (~0,9)
$T_{ass}$ = temperatura dell'assorbitore (~100°C)
$T_{amb}$ = temperatura dell'ambiente (~20°C)
$U_{eff}$ = coefficiente di trasmissione termica del collettore (~4x10$^{-3}$ kW/m²K)
$I_{perd} = U_{eff}(T_{ass} - T_{amb})$ = perdite del collettore per trasmissione (~0,32 kW/m²)

$I_{coll} = I_{inc}\,\tau\,\alpha - I_{perd}$ = intensità del collettore (~0,49 kW/m²)

A = area collettore (~1 m²)
m = massa d'acaua del serbatoio (~100 litri = 100 kg)
c = calore specifico dell'acqua ( = 4,186 kJ/kgK)
$\Delta T_{serb}$ = aumento di temperatura dell'acqua del serbatoio (~40°C)

$\Delta t = (mc\Delta T_{serb})/(I_{coll}\,A)$ = 9.5 ore

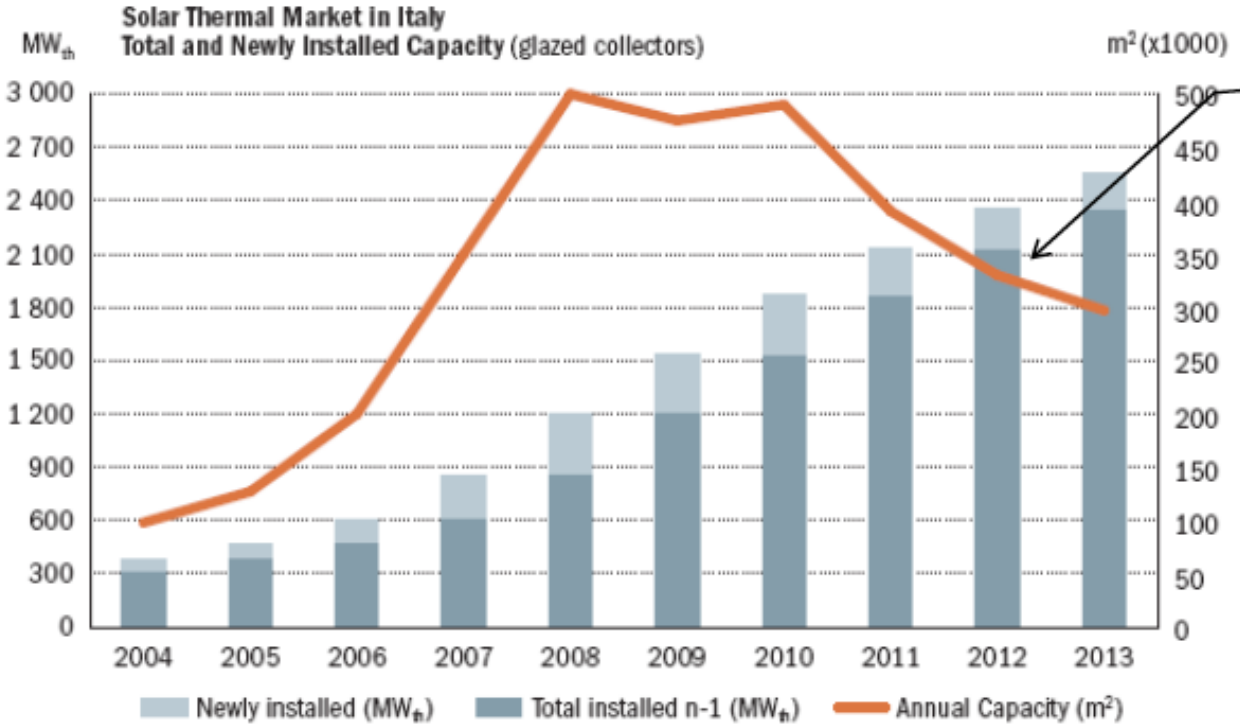
# … ancora conti …

| | | |
|---|---|---|
| litri d'acqua | 50 | /pers gio |
| $\Delta T$ | 40 | K |
| c | 4186 | J/kg K |
| $Q=mc\Delta T$ | 8.37E+06 | J |
| CO2 risparmiata | 4.65E-01 | kg/ pers |
| CO2 risparmiata in Italia per anno | 1.05E+10 | kg |

| | | |
|---|---|---|
| Energia consumata per acqua calda in Italia per anno | 1.83E+17 | J 2,3% |
| Energia consumata in Italia per anno | 8.00E+18 | J |

*Sistemi misti possono fare risparimiare fino al 60% della $CO_2$*

# *Italia*




Trend: -10%

- **Mercato in flessione**
- **Prodotti italiani: ~30%**

Mercato annuale: 210 $MW_{th}$ (300.000 m²)
Capacità installata: 2,6 $GW_{th}$ (3.6 Mm²)
Energia prodotta: 2175 GWh

*Fonte: ENEA*

# Italia

## Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili

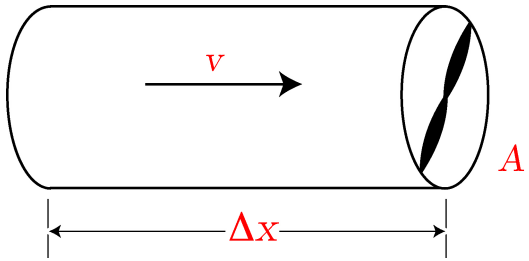
- Il **46 %** dei consumi finali di energia attesi al 2020 sono rappresentati da *energia termica per riscaldamento e raffrescamento*
- Il **21 %** di tale fabbisogno dovrà essere coperto da fonti rinnovabili, di cui circa il **6% da fonte solare termica**
- Obiettivo al 2020 per il solare termico in Italia: **1,6 Mtep** (corrispondenti a 26 Mm² installati equivalenti a 18,2 $GW_{th}$)

**Raggiungere questo obiettivo significa passare in meno di 10 anni dagli attuali 0,06 a circa 0,4 m² per abitante**

*Fonte: ENEA*

# Principi

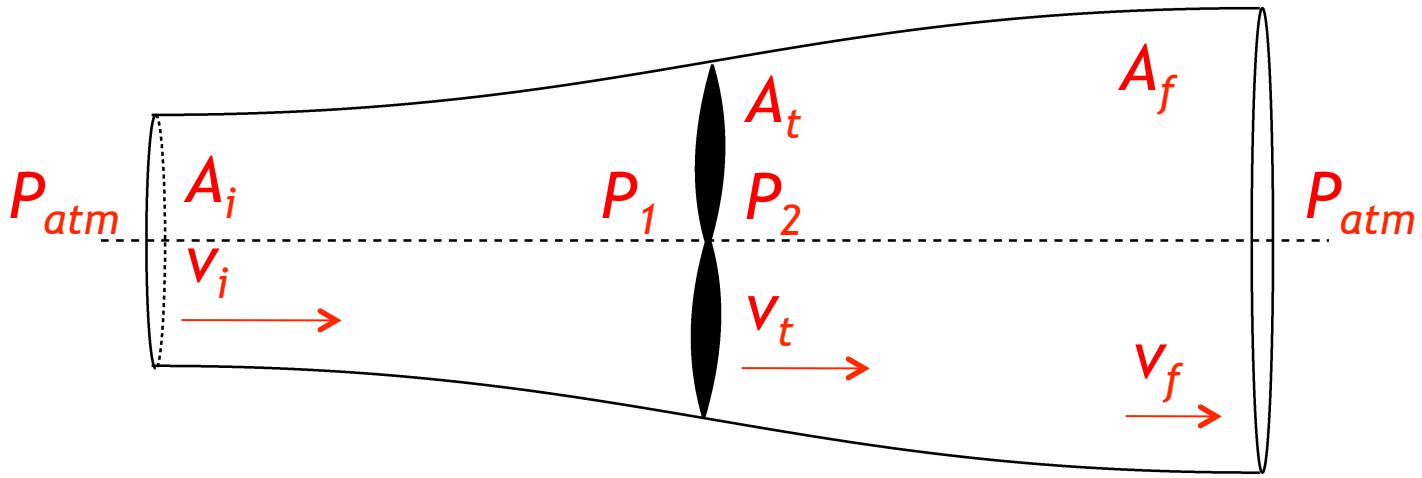
*Per una turbina con le pale di diametro d perpendicolari al vento e che coprono un'area $A=\pi(d/2)^2$:*




$$\frac{\text{Energia cinetica}}{\text{volume}} = \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$\text{Potenza} = \frac{\text{Energia cinetica}}{\text{volume}} \times \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} = \frac{1}{2}\rho v^2 \times A\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

# Limite di Betz




*A = area sezione tubo di flusso*
*v = velocità vento*
*P = pressioni*

*tubo di flusso dell'aria che passa attraverso la turbina*

*(1)* $\text{Potenza} = Fv = \Delta P A_t v = (P_1 - P_2) A_t v_t$ *(F=forza sulla turbina)*

*(2)* $F = (P_1 - P_2) A_t = \text{variazione q. di moto} = \dfrac{\Delta m v}{\Delta t} = \dfrac{m}{\Delta t}\Delta v = \rho A_i v_i (v_f - v_i)$

*(3)* $A_i v_i = A_t v_t = A_f v_f$ *(equazione di continuità)*

*(4)* $\begin{cases} P_{\text{atm}} + \dfrac{1}{2}\rho v_i^2 = P_1 + \dfrac{1}{2}\rho v_t^2 \\ P_{\text{atm}} + \dfrac{1}{2}\rho v_f^2 = P_2 + \dfrac{1}{2}\rho v_t^2 \end{cases}$ *(equazioni di Bernoulli applicate prima e dopo la turbina)*

# Limite di Betz

Da (4): $(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho\left(v_i^2 - v_f^2\right)$

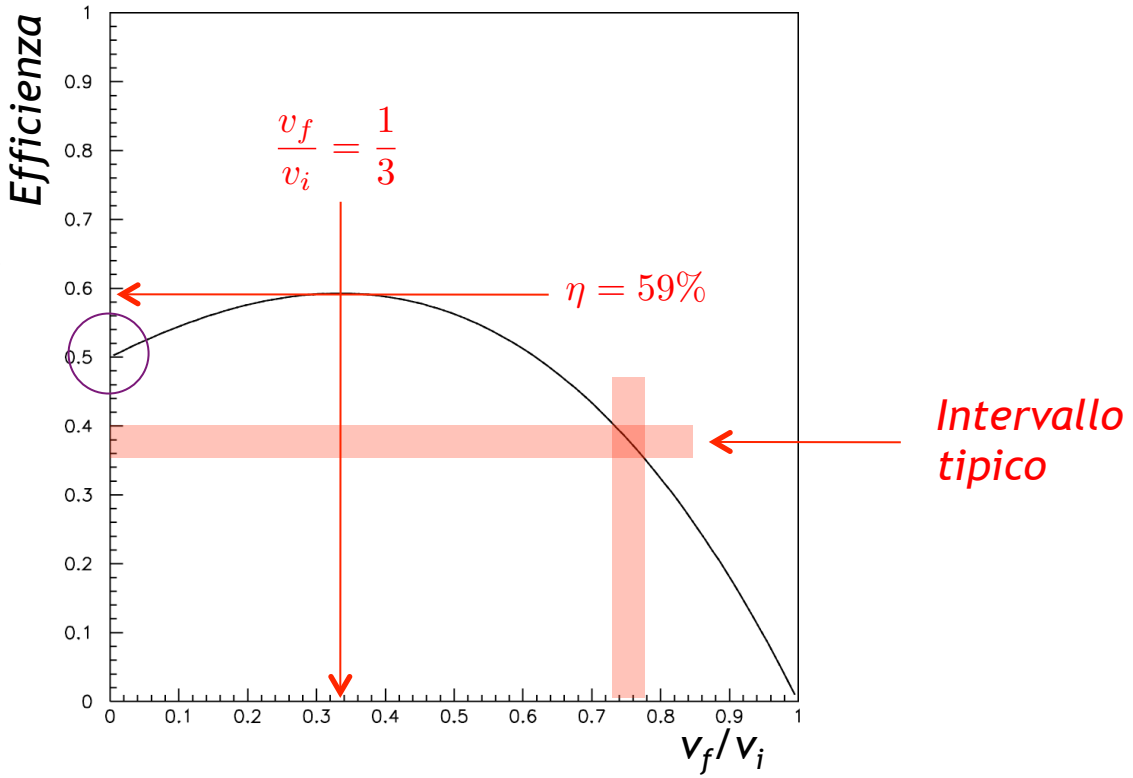
Da (2): $\frac{A_i}{A_t} v_i = v_f$

Da (3): $(P_1 - P_2) = \rho \frac{A_i}{A_t} v_i \left(v_i - v_f\right) = \rho v_t \left(v_i - v_f\right)$

$$v_t = \frac{1}{2}\left(v_i + v_f\right)$$

*Efficienza= rapporto tra la potenza reale e la potenza massima teoricamente disponibile*

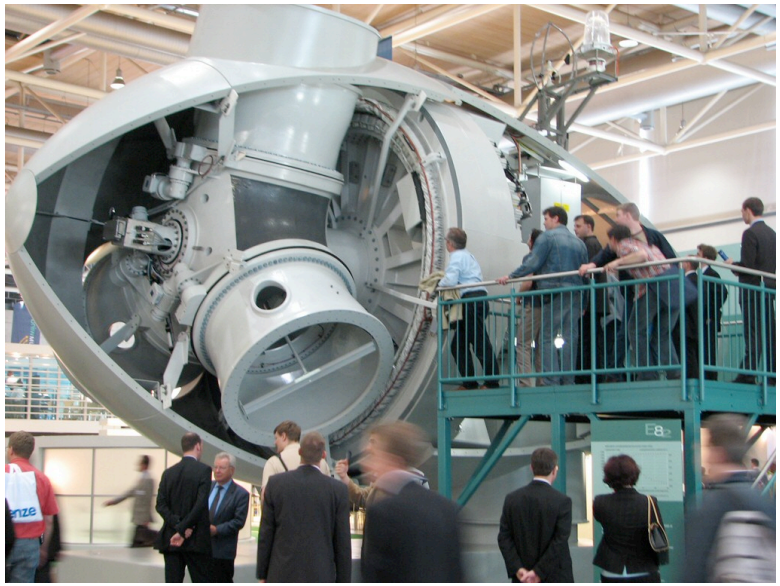
$$\eta = \frac{\text{Potenza}}{\frac{1}{2}\rho A_t v_i^3} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{v_f}{v_i}\right)\left(1 + \frac{v_f}{v_i}\right)^2$$



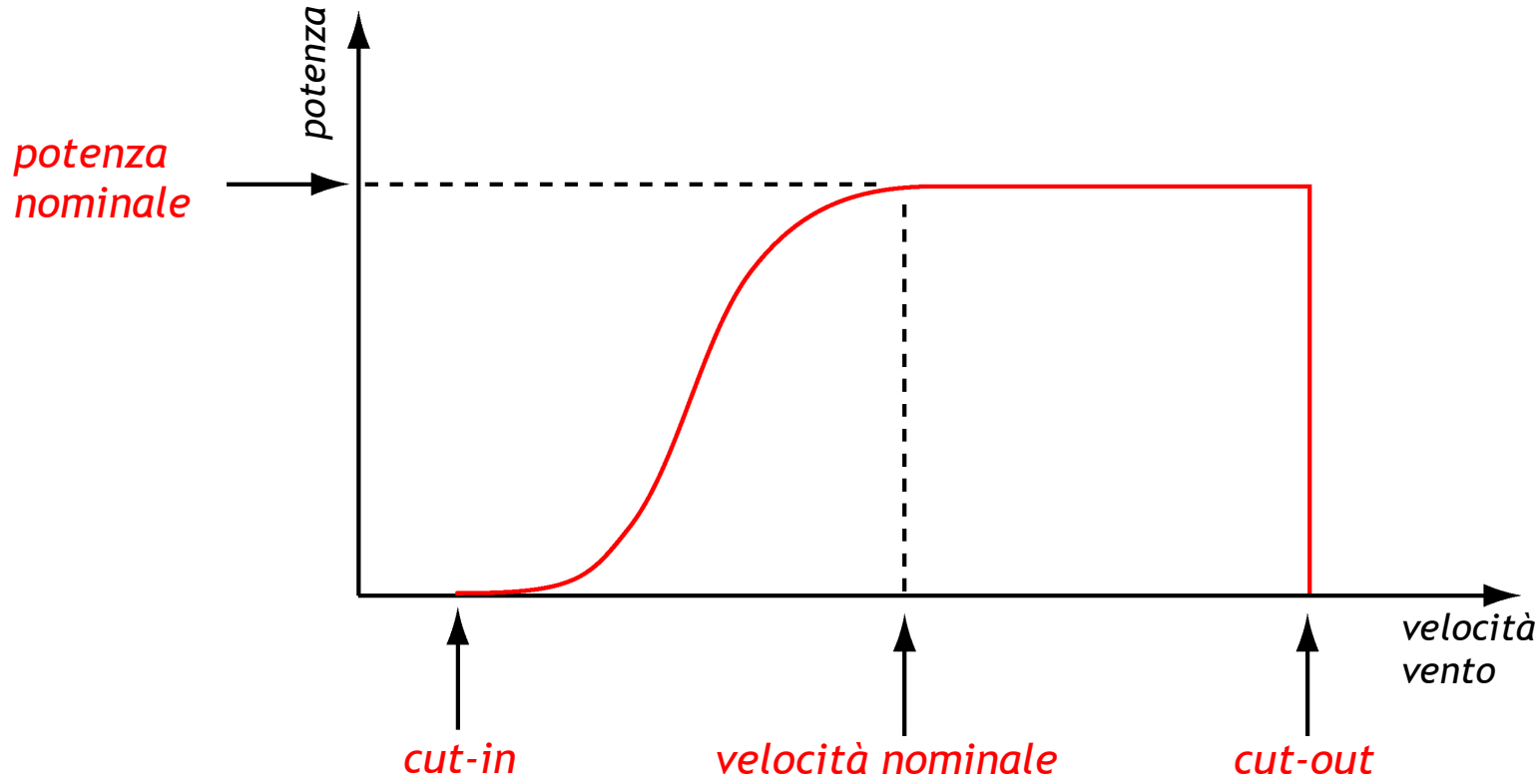

*a bassissima velocità di uscita del vento, il modello non è realistico perchè implicherebbe un'area di uscita infinita*

# Impianto

*Velocità punta pale: 60 m/s*
*Giri/min: 20*



# Curva di potenza



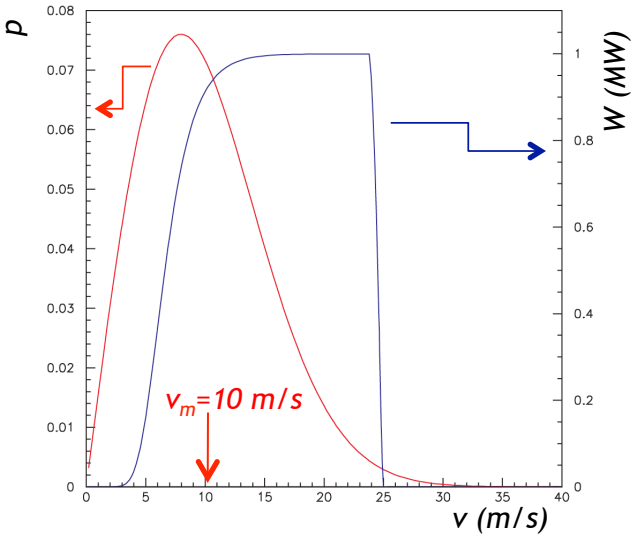

*A velocità del vento molto basse, non c'è coppia sufficiente esercitata dal vento sulle pale delle turbine per farle ruotare. Tuttavia, con l'aumentare della velocità, la turbina inizierà a ruotare e generare energia elettrica. La velocità del vento alla quale la turbina inizia a ruotare è chiamata velocità di "cut-in" ed è di solito tra i 3 e i 4 metri al secondo.*

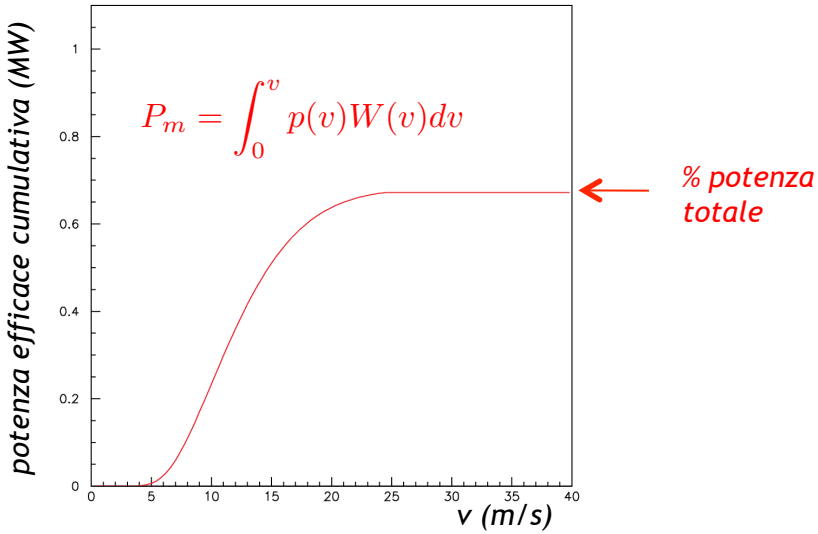
*Quando la velocità del vento supera il cut-in, il livello di output di potenza elettrica aumenta rapidamente Tra i 12 ei 17 metri al secondo, la potenza raggiunge il limite del generatore elettrico. Questo limite è chiamata la potenza nominale e la velocità del vento alla quale si raggiunge è chiamata la velocità nominale del vento in uscita.*

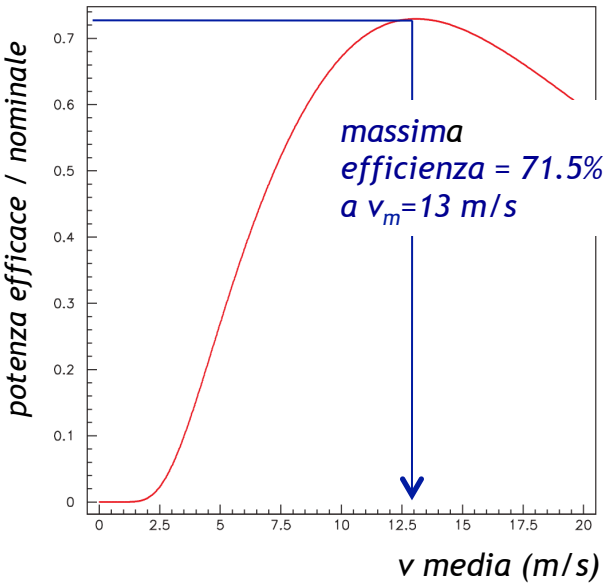
*Quando la velocità aumenta, le forze sulla struttura delle turbine aumentano e, ad un certo punto, c'è il rischio di danni al rotore. Come risultato, un impianto frenante è impiegato per portare il rotore a un punto morto. Questo è chiamata la velocità di "cut-out" (circa 25 metri al secondo).*

# Potenza efficace

*La potenza efficace è la convoluzione della distribuzione del vento p(v) e della curva di potenza W(v).*




*Variando la velocità media del vento si hanno due effetti:*

- *diminuzione dell'efficienza quando la velocità media si abbassa (effetto del cut-in)*
- *diminuzione dell'efficienza quando la velocità media si alza (effetto del cut-out)*

# Macchine

*Macchina di media taglia*
*(P=600 kW; $d_{pale}$=43 m; H=45 m)*

*Macchina di grande taglia*
*(P=2 MW, $d_{pale}$=60 m; H=68 m)*

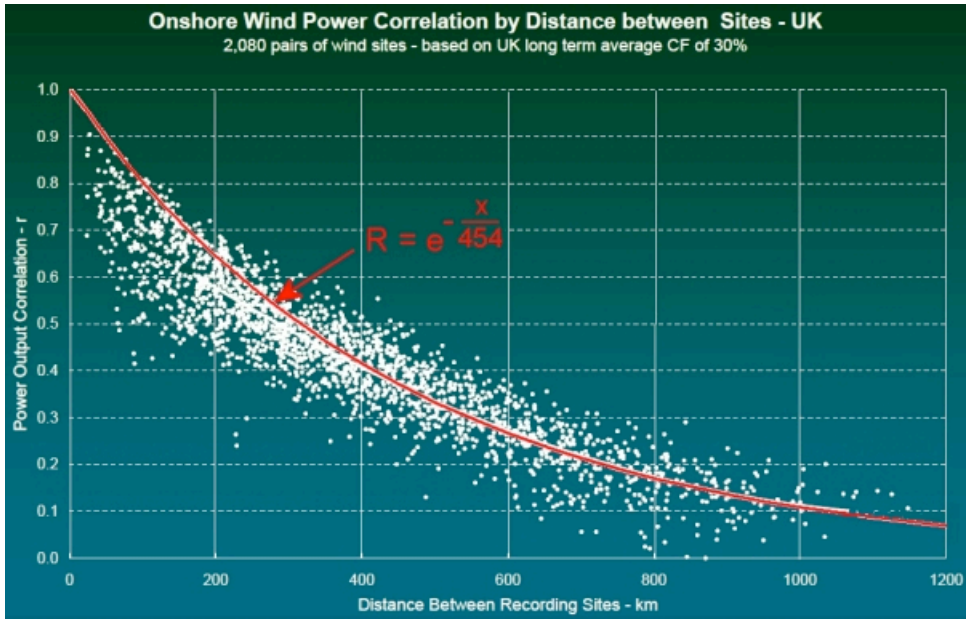
# Riduzione dell'intermittenza

*Se le turbine sono scorrelate, la fluttuazione nella potenza totale di N turbine è inferiore a quella di una singola turbina secondo la relazione:*

$$\frac{\sigma_{\rm tot}}{P_{\rm tot}} = \frac{1}{\sqrt{N}}\frac{\sigma}{P}$$

*Se le turbine sono totalmente correlate:*

$$\frac{\sigma_{\rm tot}}{P_{\rm tot}} = \frac{\sigma}{P}\sqrt{2-\frac{1}{N}} > \frac{\sigma}{P}$$




*Correlazione:* $R = e^{-d/L}$

*Lunghezza di correlazione L=450 km.*
*Le turbine non sono mai anticorrelate.*

*http://www.wind-power-program.com/intermittency.htm*

# Dove - Europa

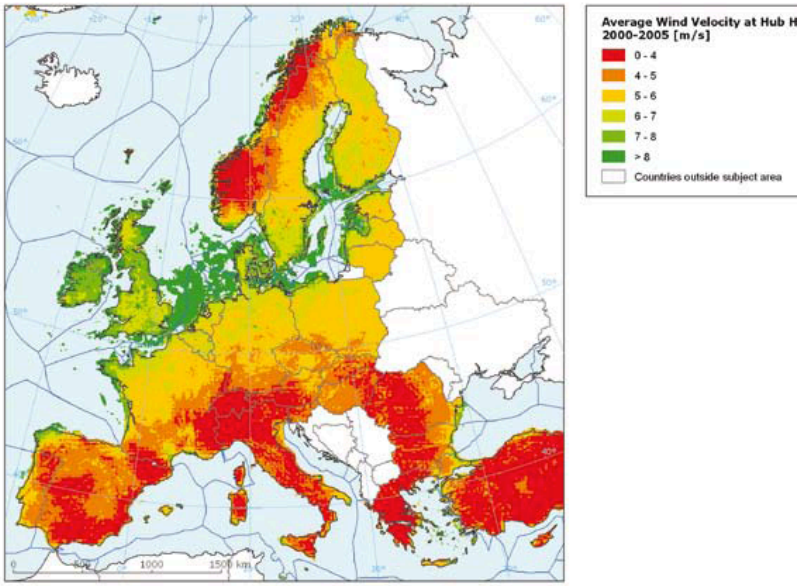
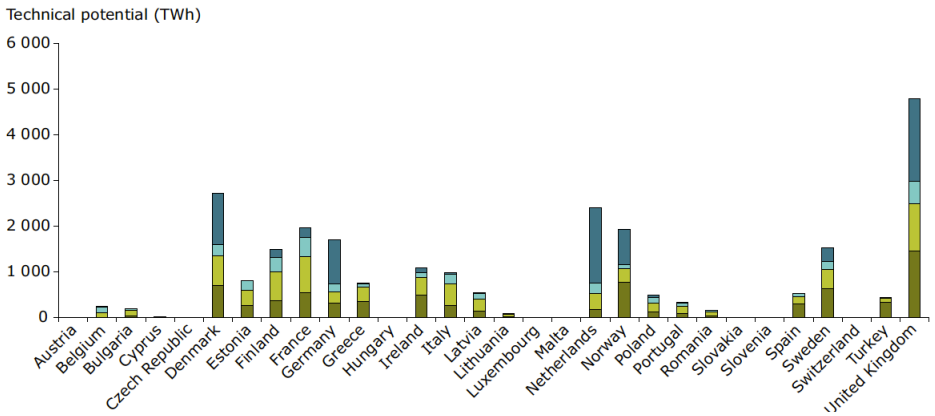
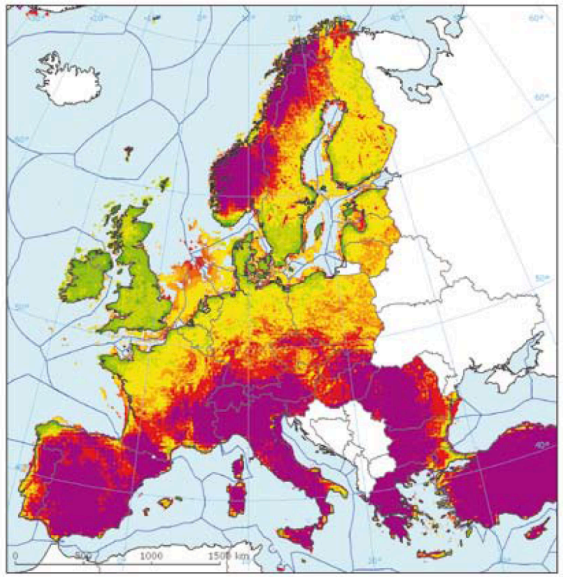
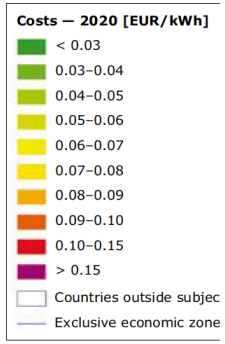



**Figure 3.5** **Unrestricted technical potential for offshore wind energy in 2030 based on average wind speed data**

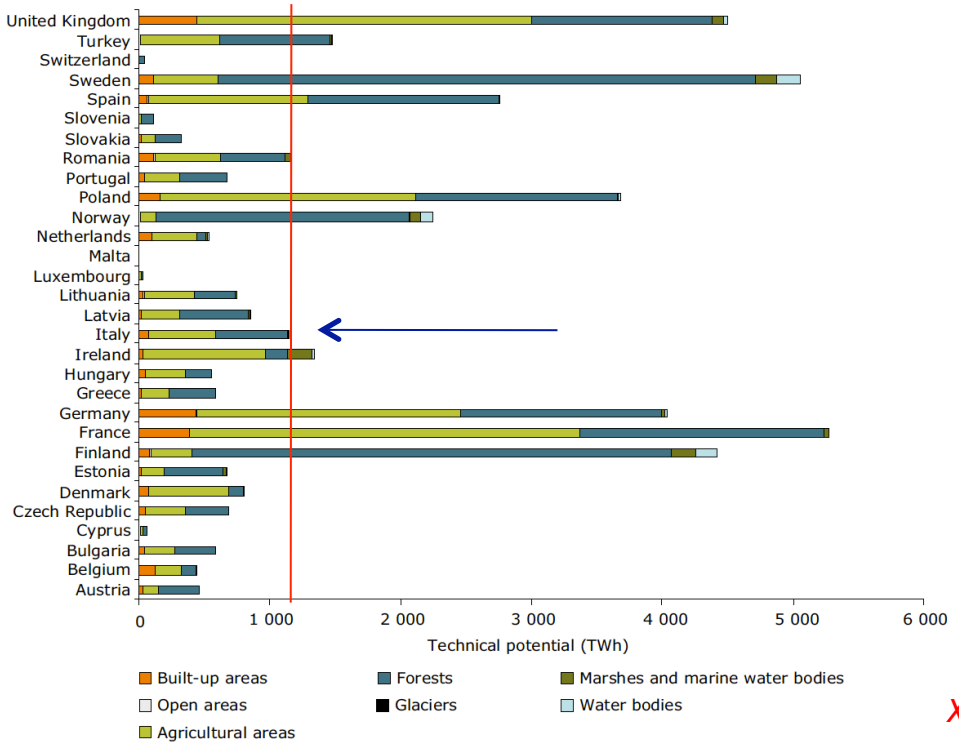




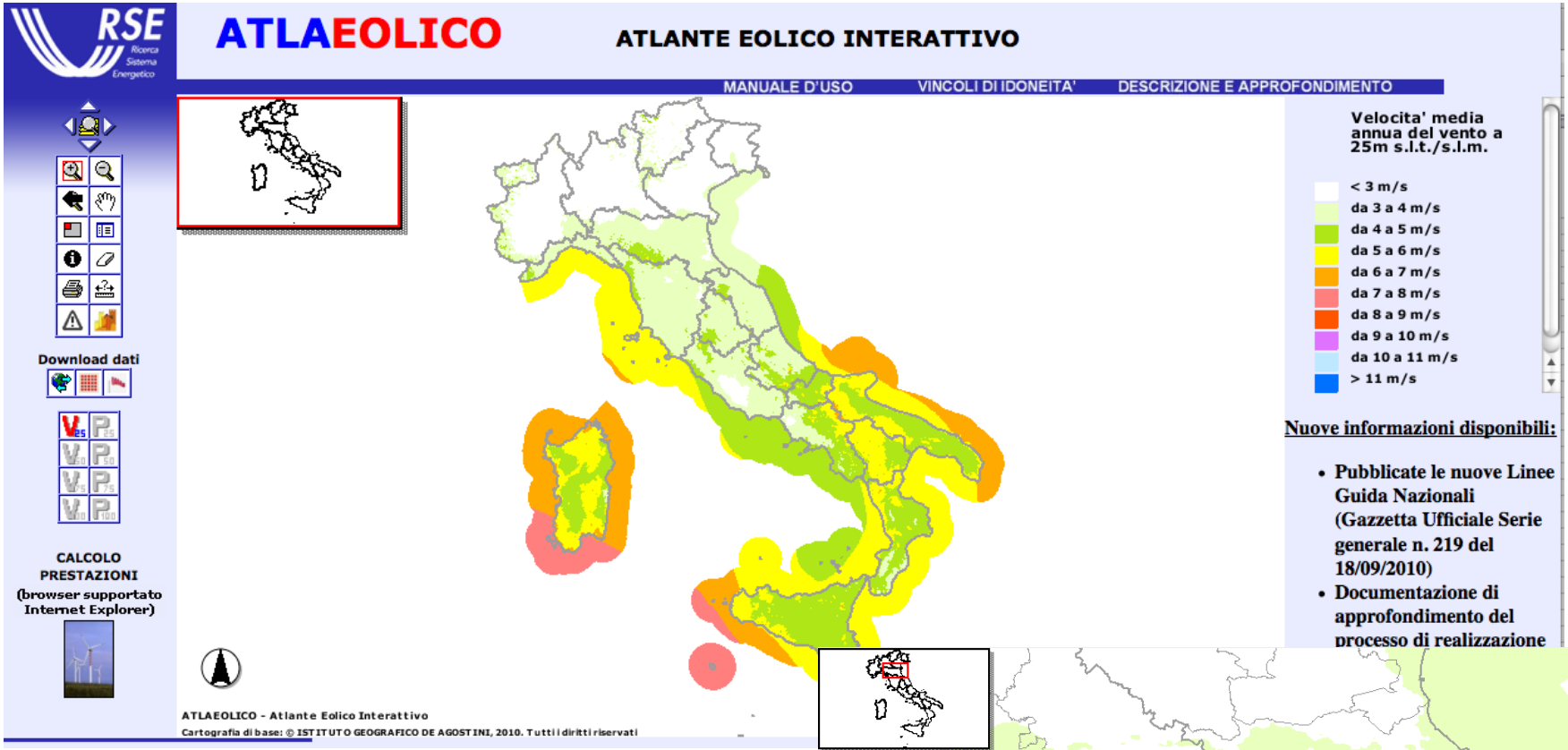

**Source:** EEA, 2008.

**Figure 3.2** **Unrestricted technical potential for onshore wind energy up to 2030, based on estimated 80 m average wind speeds 2000–2005**




*European Environmental Agency, Technical report No 6/2009*

# Dove - Italia / ER




http://atlanteeolico.rse-web.it/viewer.htm

# Installato

## Top 15 countries by total wind installations

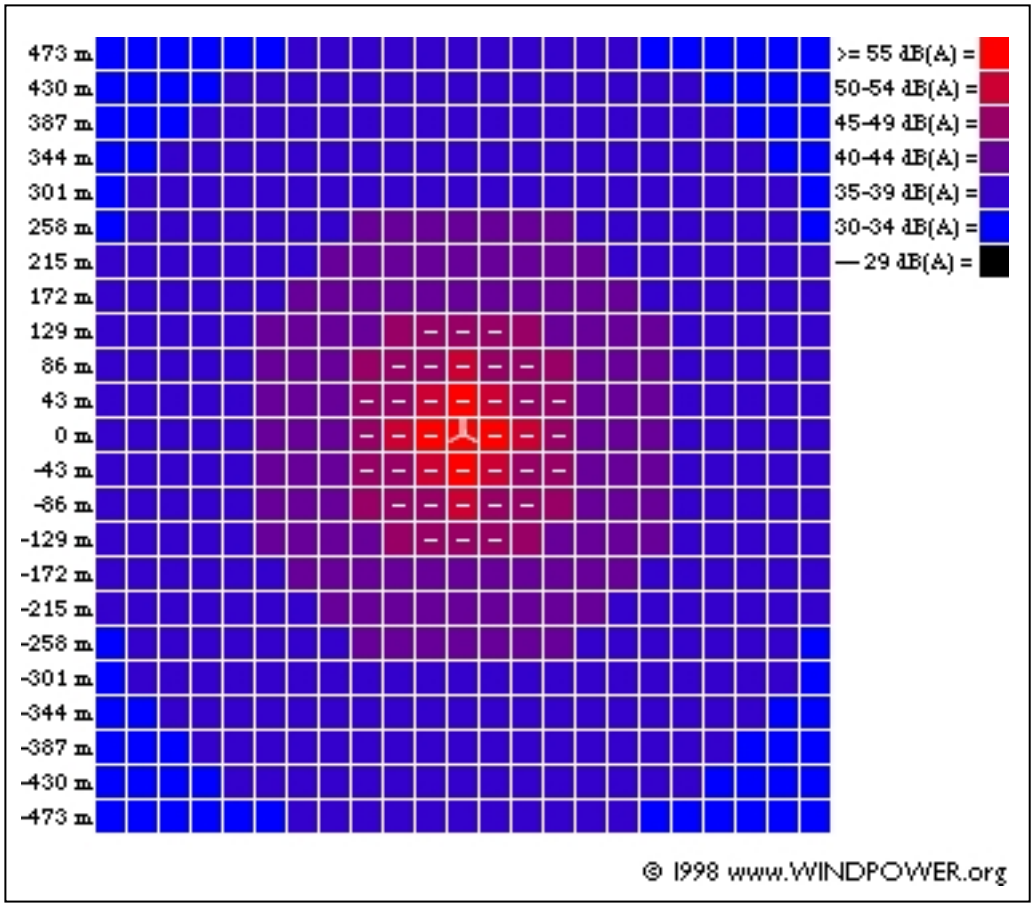
| Position 2015 | Country/Region | Total capacity end 2015** [MW] | Added capacity 2015*** [MW] | Growth rate 2015 [%] | Total capacity end 2014 [MW] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | China | 148'000 | 32'970 | 29.0 | 114'763 |
| 2 | United States | 74'347 | 8'598 | 13.1 | 65'754 |
| 3 | Germany | 45'192 | 4'919 | 11.7 | 40'468 |
| 4 | India * | 24'759 | 2'294 | 10.2 | 22'465 |
| 5 | Spain | 22'987 | 0 | 0.0 | 22'987 |
| 6 | United Kingdom | 13'614 | 1'174 | 9.4 | 12'440 |
| 7 | Canada | 11'205 | 1'511 | 15.6 | 9'694 |
| 8 | France | 10'293 | 997 | 10.7 | 9'296 |
| 9 | Italy | 8'958 | 295 | 3.4 | 8'663 |
| 10 | Brazil | 8'715 | 2'754 | 46.2 | 5'962 |
| 11 | Sweden | 6'025 | 615 | 11.1 | 5'425 |
| 12 | Poland | 5'100 | 1'266 | 33.0 | 3'834 |
| 13 | Portugal | 5'079 | 126 | 2.5 | 4'953 |
| 14 | Denmark | 5'064 | 217 | 3.7 | 4'883 |
| 15 | Turkey | 4'718 | 955 | 25.4 | 3'763 |
| | | | | | |
| | Rest of the World | 40'800 | 5'000 | 14.0 | 35'799 |
| | **Total** | **434'856** | **63'690** | **17.2** | **371'374** |

© WWEA - 2016

* by november 2015
** Includes all installed wind capacity, connected and not-connected to the grid.
*** Includes the net capacity addded during the year 2015.

*http://www.wwindea.org/webimages/Half-year_report_2015.pdf*

# Rumore



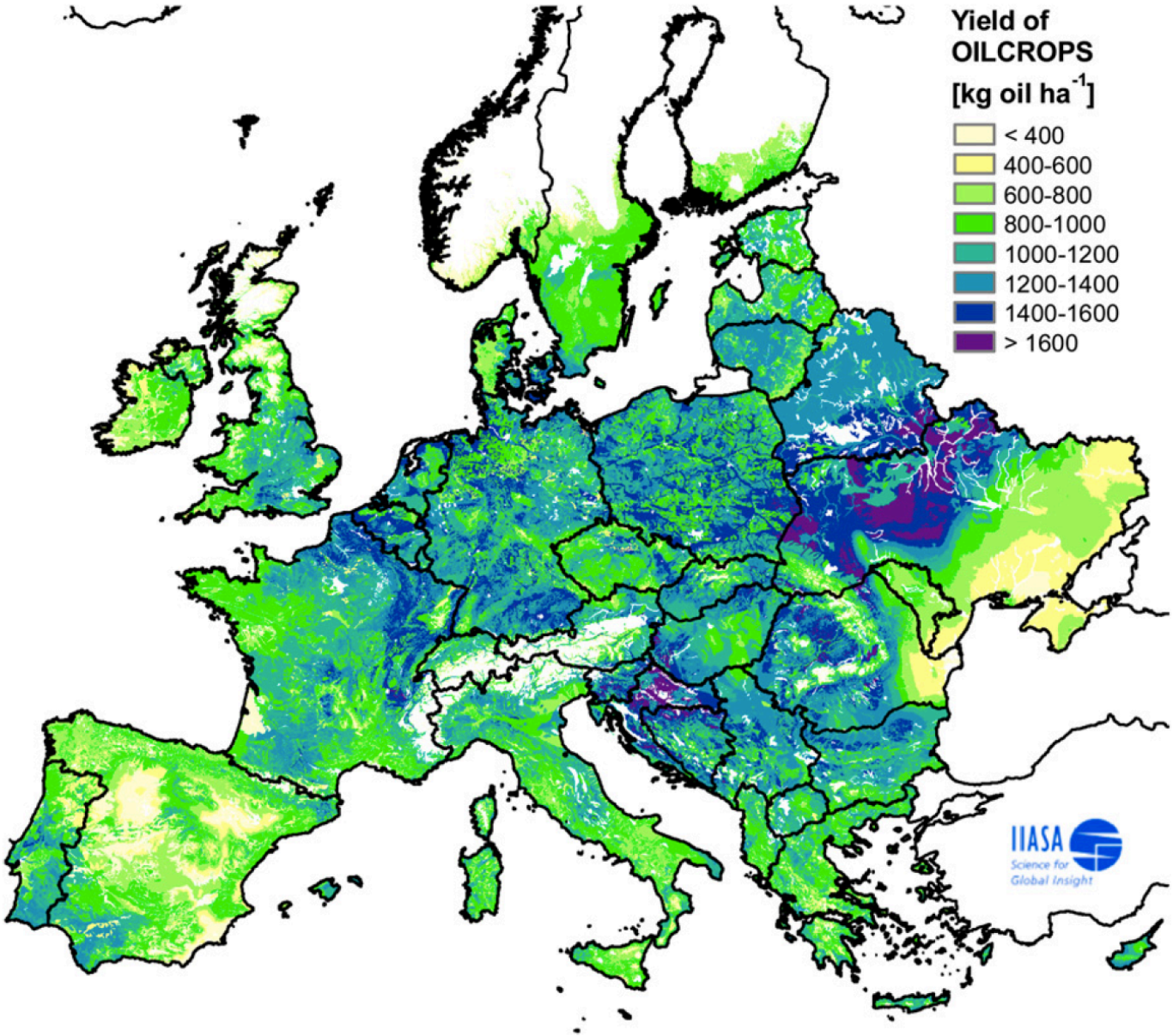

*Distanza fra i generatori:*
*5 x diametro pale*

# Biomasse

- *Piante coltivate e scarti di lavorazione agricole e boschive seccate ➡ combustibile*
- *Piante da semi oleaginosi ➡ olio esterificato (biodiesel)*
- *Piante produttrici di amido o glucosio ➡ etanolo*
- *Biomassa pirolizzata ➡ bioolii combustibili (o sostitutivi del petrolio nell'industria chimica)*
- *Biomassa fermentata ➡ biogas combustibile*

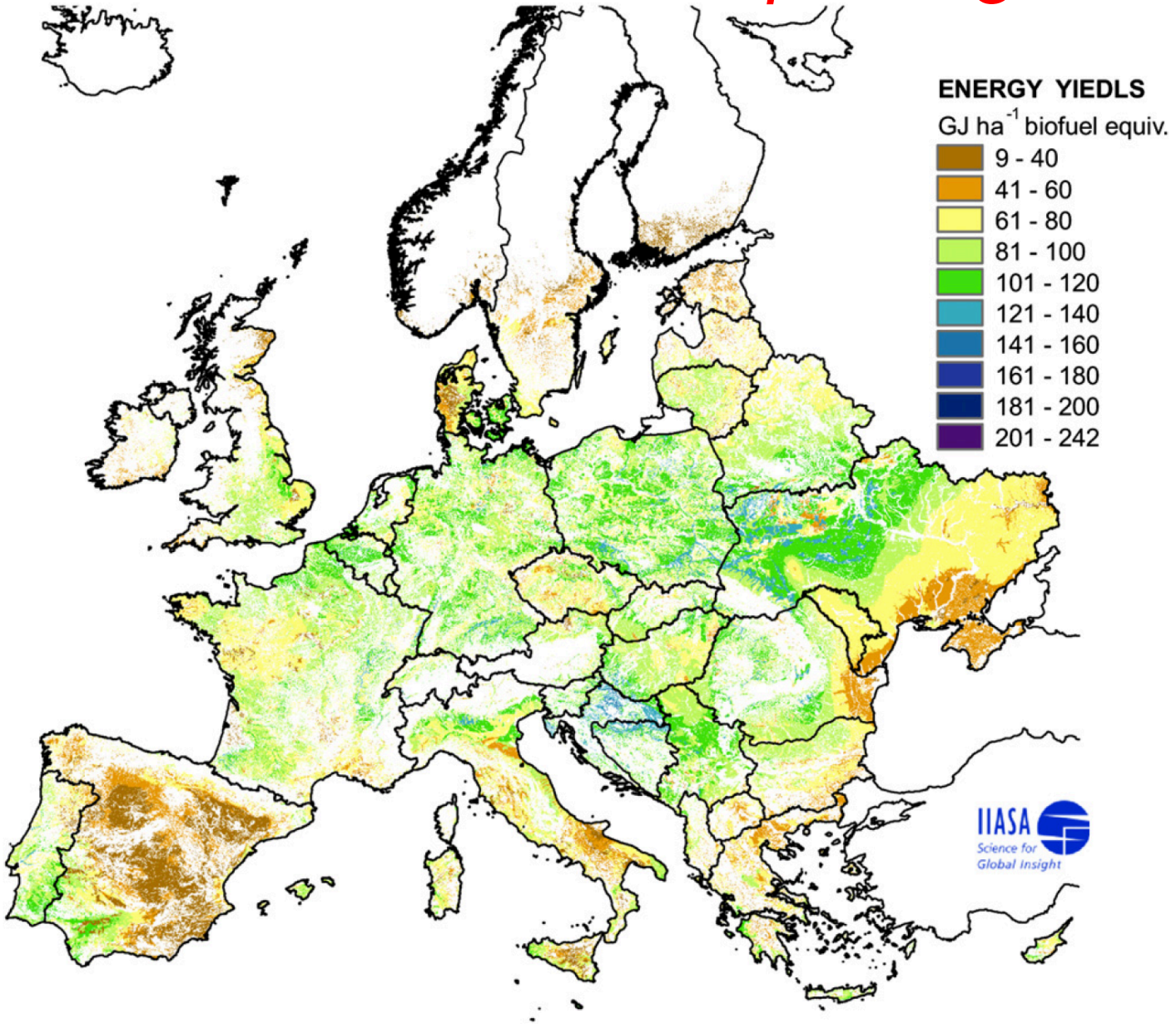
*Tutti questi sistemi producono altrettanta $CO_2$ di quanta ne è sequestrata nella biomassa e sono quindi neutri da questo punto di vista.*

# Risultati - piante da olio



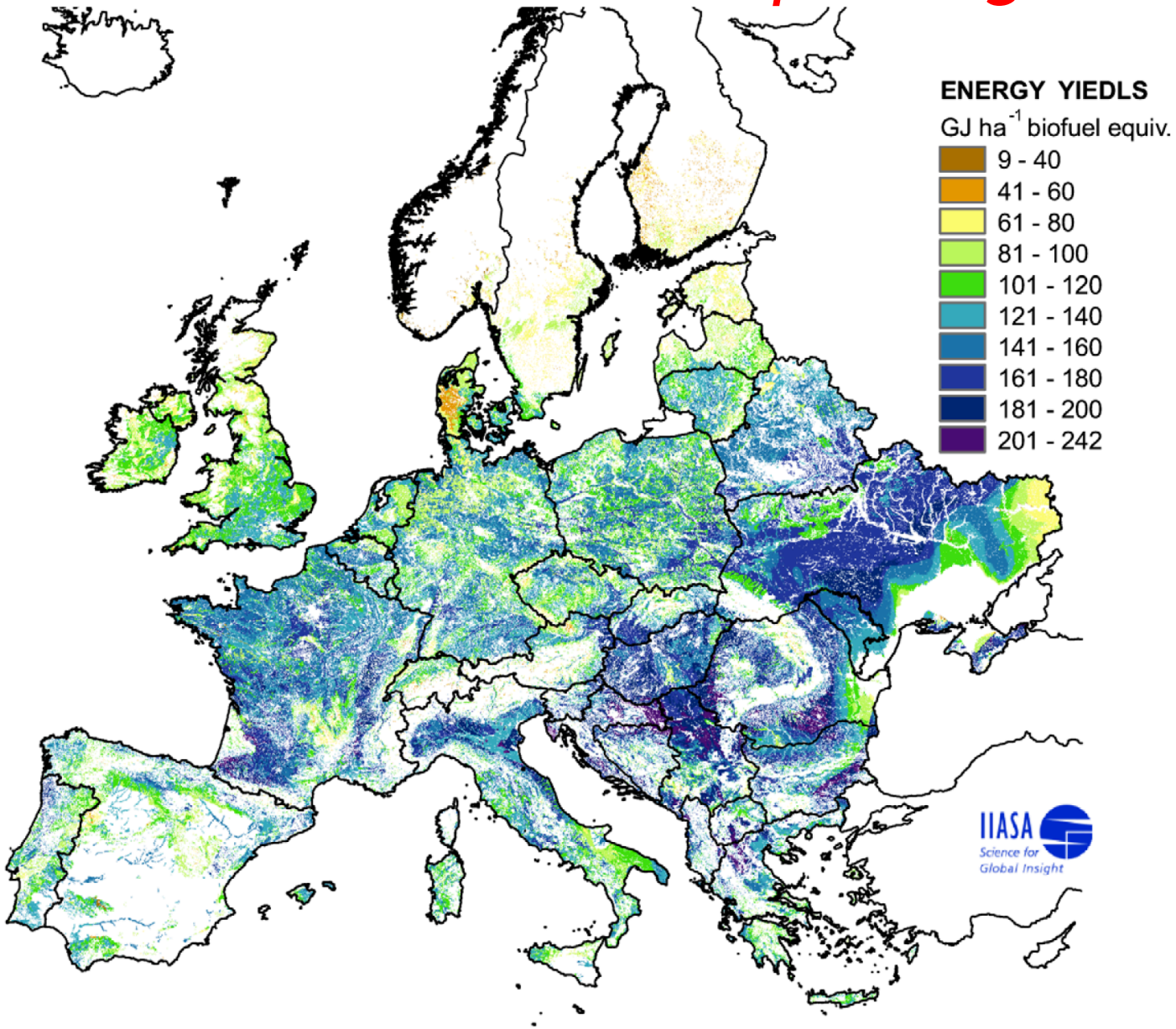

*G. Fischer, S. Prieler, H.van Velthuizen, S. M. Lensink, M. Londo, M. de Wit, Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part I: Land productivity potentials, Biomass and Bioenergy, 34 (2010 ) 159 - 172*

# Risultati – coltivazioni per 1ª generazione




*G. Fischer, S. Prieler, H.van Velthuizen, S. M. Lensink, M. Londo, M. de Wit, Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part I: Land productivity potentials, Biomass and Bioenergy, 34 (2010 ) 159 – 172*

# Risultati – coltivazioni per 2ª generazione

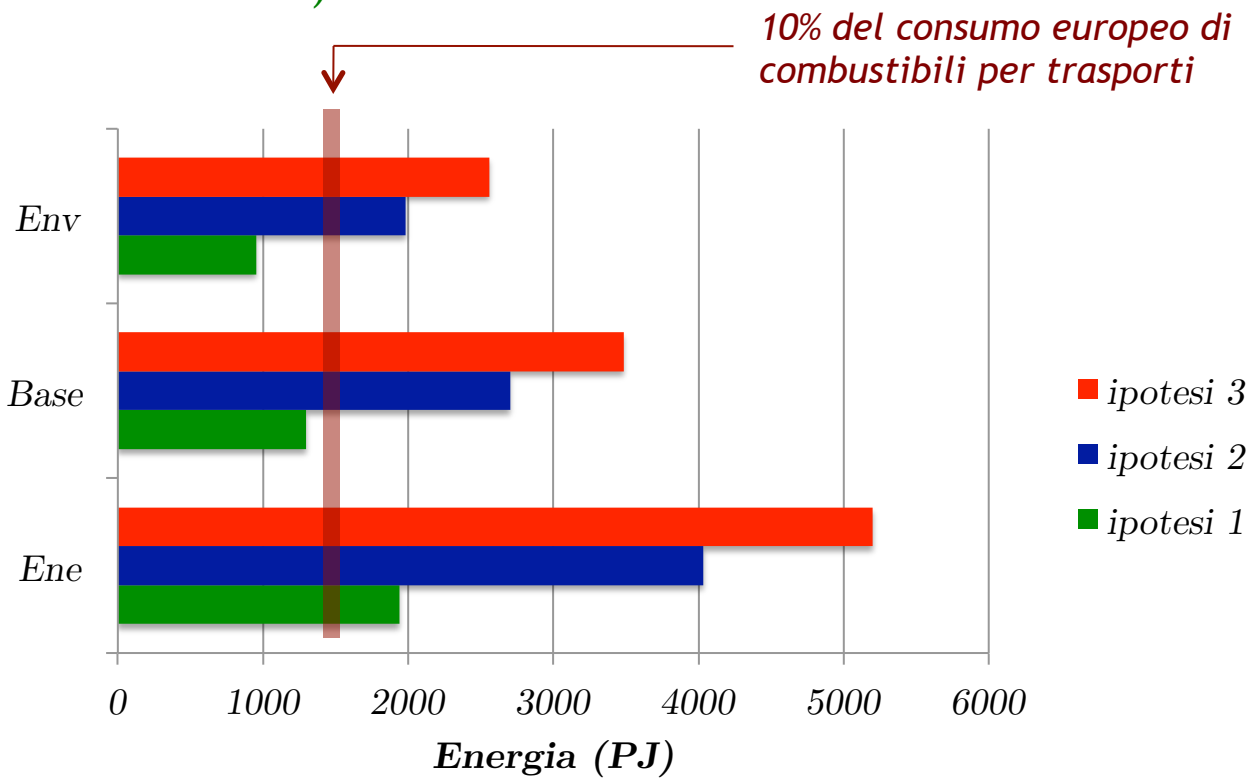



*G. Fischer, S. Prieler, H.van Velthuizen, S. M. Lensink, M. Londo, M. de Wit, Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part I: Land productivity potentials, Biomass and Bioenergy, 34 (2010 ) 159 – 172*

# Energia producibile da EU27 (no Ucraina)

*Disponibilità di terreno: da 22 Mha (scenario Env) a 45 Mha (scenario Ene)*
*Energia ricavabile:*

*ipotesi 1: tutto il terreno disponibile a olio*
*ipotesi 2: tutto il terreno disponibile con la migliore coltivazione 1ª generazione*
*ipotesi 3: tutto il terreno disponibile con coltivazioni 2ª generazione (solo biocombustibile)*



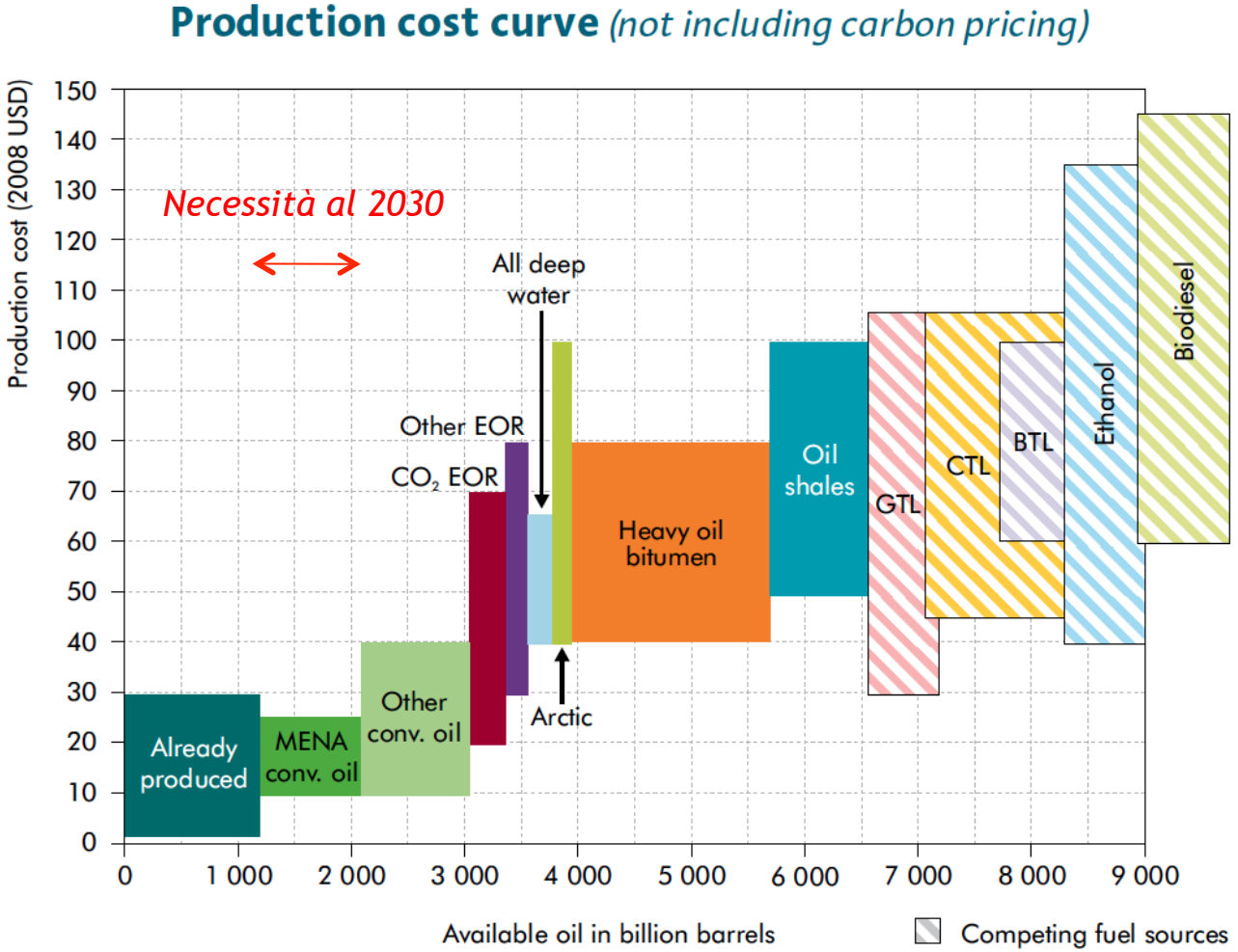

**+ 1500 PJ con i residui**


G. Fischer, S. Prieler, H.van Velthuizen, G. Berndes, A. Faaij, M. Londo, M. de Wit, Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part II: Land use scenarios, Biomass and Bioenergy, 34 (2010 ) 173-187

# Curva Cost/Supply per il petrolio

*Costi medi estrazione petrolio (2012):*

*25 US$/barile*
*20 €/barile*
*159 l/barile*
*0.85 kg/l*
*10000 kcal/kg*
*41860000 J/kg*
*35581000 J/l*
*0.036 GJ/l*
*5.66 GJ/barile*
*3.5 €/GJ*



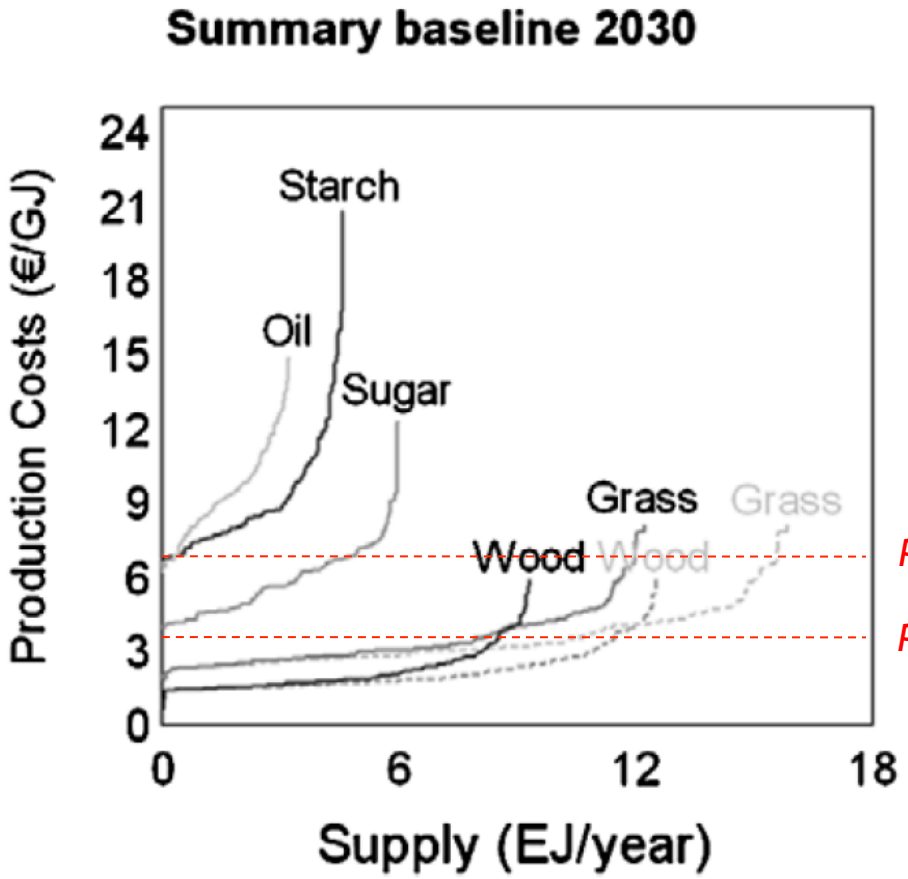

*EOR: Enhanced Oil Recovery*
*GTL: Gas To Liquid*
*CTL: Coal To Liquid*
*BTL: Biomass To Liquid*

*Fonte: IEA*

# Risultati – confronto con il petrolio

*Il consumo annuale di petrolio in Europa nel 2009 è stato di circa 16 milioni di barili al giorno, cioè di 33 EJ/anno.*

*Le disponibilità a prezzi concorrenziali potranno coprire una frazione significativa delle necessità solo se verranno utilizzate le colture lignocellulosiche*




*Petrolio 2030*

*Petrolio oggi*

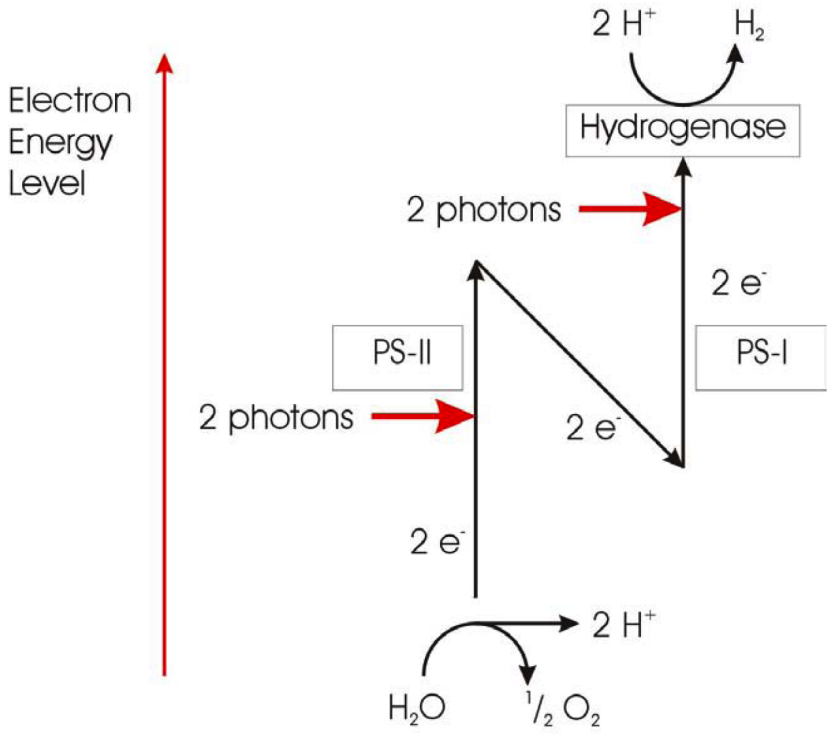
*M. de Wit, A. FAAIJ, European biomass resource potential and costs, Biomass and Bioenergy, 34 (2010 ) 188-202*

# Produzione di idrogeno da alghe

*Alga*: *Chlamydomonas reinhardtii*

*Metodo*: *crescita in ambiente normale, coltivazione successiva in condizioni anaerobiche in ambiente privo di zolfo*

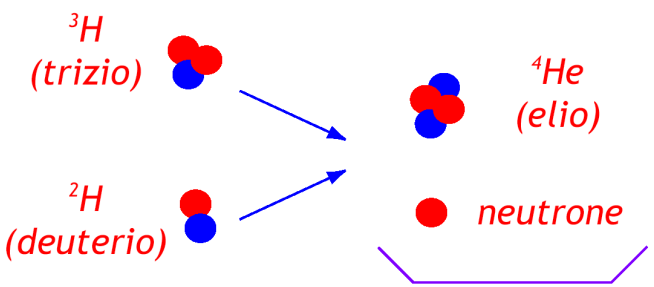
*National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA*



# *Luce solare diretta*

*E possibile sostituire parzialmente l'illuminazione interna degli edifici con sistemi basati su fibre ottiche*

# Nucleare a fusione




*Energia cinetica totale dei prodotti: 17.6 MeV (=3.5 MeV/nucleone)*

*Energia di soglia: 10 keV = 116x10$^6$ °C*

*A T>10000°C un gas diventa "plasma", cioè un insieme di elettroni e nuclei slegati.*
*Poichè elettroni e nuclei sono elettricamente carichi, possono essere mantenuti in orbite chiuse tramite campi magnetici toroidali.*

*Il deuterio può essere estratto dall'acqua.*
*Il trizio può essere prodotto per interazione dei neutroni su litio, contenuto nel liquido di raffreddamento.*

*Vantaggio:*
*radioattività residua molto minore dei reattori a fissione (10$^{-5}$) perchè dovuta essenzialmente ad attivazione dei materiali di costruzione.*

*Problema:*
*instabilità che impediscono di mantenere il plasma confinato per un tempo abbastanza lungo da permettere la produzione di una quantità di energia sufficiente a compensare l'energia che viene spesa a far funzionare il reattore.*

*Prototipi esistenti: JT-60 (Giappone), TFTR (USA), JET (Europa)*

*R~3.5 m*
*potenza generata: 10÷100 MW*
*costo: 1000 M$*

*Futuro:*
*>10-15 anni: reattore sperimentale scientifico/tecnologico*
*>10-15 anni: reattore sperimentale commerciale*
*>10-15 anni: reattore commerciale*