## Dispensa del corso di "SISTEMI ENERGETICI"

Argomento: Sistemi Energetici (parte 4)

## Prof. Pier Ruggero Spina

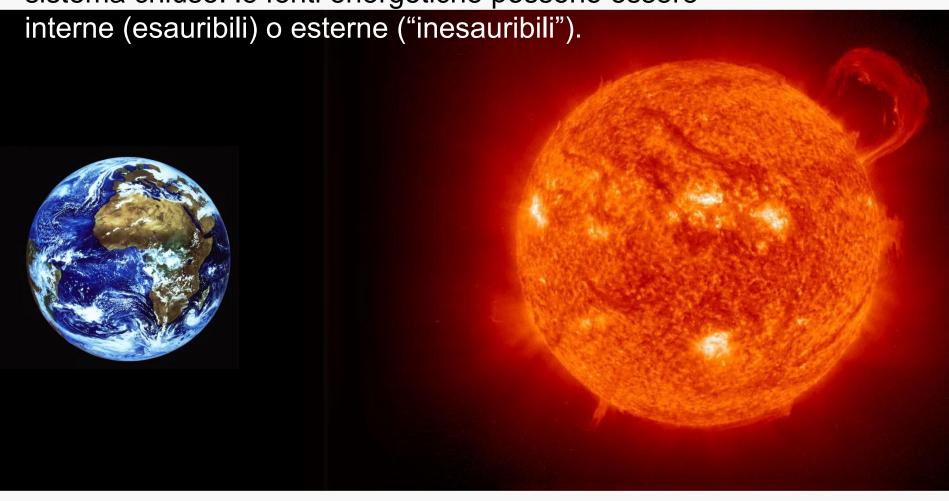
Dipartimento di Ingegneria



## Fonti energetiche rinnovabili

#### Le fonti di energia primarie

La Terra termodinamicamente può essere vista come un sistema chiuso: le fonti energetiche possono essere



## Le fonti di energia primarie

• Combustibili fossili

Petrolio

Gas

Carbone

 Materiale radioattivo e/o nucleare

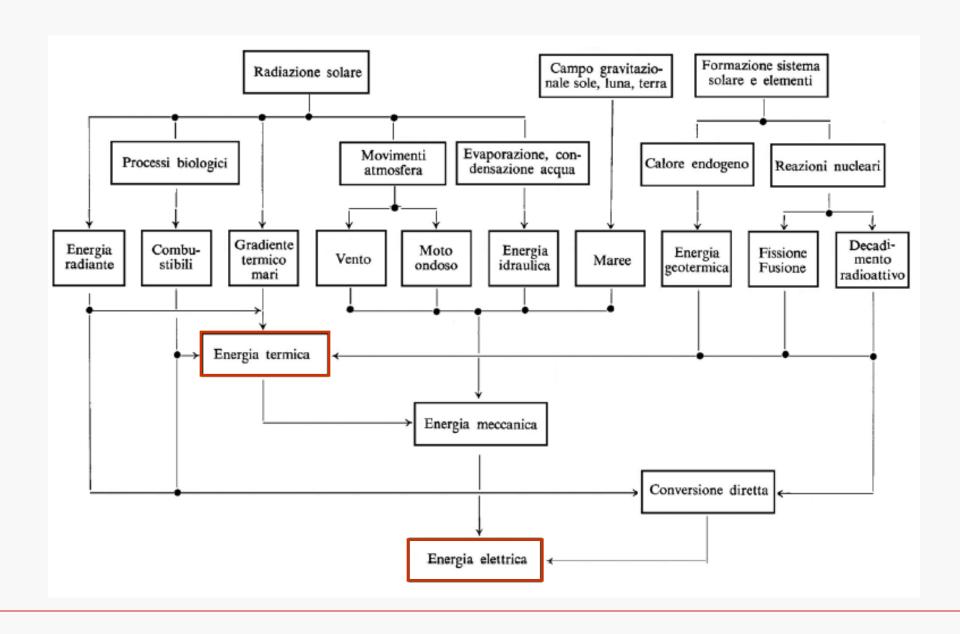
Radiazione solare

- Solare fotovoltaico
- Solare termodinamico
- Solare termico
- Idroelettrico
- Eolico
- Biomasse

Altre

- Maree
- Rifiut

#### Fonti di energia primarie



#### Definizione di rinnovabile e non rinnovabile

- ✓ Rinnovabili: fonti energetiche primarie inesauribili, cioè in grado di rigenerarsi costantemente con processi naturali o, comunque, caratterizzate da durate molto grandi rispetto alla scala dei tempi umani
- ✓ Non rinnovabili: fonti energetiche primarie consumate con velocità di gran lunga maggiori di quelle di formazione
  - fonte fossile (petrolio, gas naturale, carbone)
  - fonte nucleare (uranio)

## Fonti di energia rinnovabile

- Energia Solare
- ✓ Energia Eolica
- ✓ Energia Idraulica
- Energia Geotermica



- Energia dal Mare (moto ondoso e maree)
- ✓ Energia dalle Biomasse

#### ✓ Energia Solare

- energia ricevuta dal Sole: 131 000 Gtep/anno
- questa è circa 10000 volte l'attuale consumo di energia primaria

## ✓ Energia Eolica

- lo 0.2 % dell'energia ricevuta dal Sole è convertita in energia meccanica del vento e delle correnti marine
- l'energia meccanica disponibile dal vento e dalle correnti marine è, quindi, 260÷300 Gtep/anno

## ✓ Energia Idraulica

- massa di acqua: 50·000 miliardi di m<sup>3</sup>
- salto geodetico medio: 400-500 m
- rendimento di un impianto idroelettrico: 75-85%
- frazione tecnicamente sfruttabile: 30-40%
- frazione economicamente utilizzabile: 40-50%
- l'energia elettrica producibile è, quindi, 5000-12000 TWh/anno
- oggi si producono circa 3000 TWh/anno (16.6% dell'en. el. totale)

È una fonte energetica matura, che presenta ancora margini di crescita, soprattutto nei Paesi in Via di Sviluppo.

## ✓ Energia Geotermica

- Energia termica totale contenuta all'interno del globo terrestre: 1031 J
- energia termica contenuta nelle rocce a 3 km di profondità: 43x10<sup>24</sup> J (10<sup>9</sup> Mtep)
- Flusso energetico attraverso la crosta terrestre: 860x10<sup>18</sup> J/y
  (20500 Mtep)
- Fabbisogno potenzialmente soddisfacibile: 350÷600000x10<sup>18</sup> J/y (8400÷14000000 Mtep)
- Fabbisogno che potrebbe essere soddisfatto al 2020: 3.5x10<sup>18</sup> J
  (84 Mtep)
- il gradiente di temperatura medio è pari a circa 30 °C/km

#### ✓ Energia dal Mare (moto ondoso e maree)

Tipo di energia	Tecnologia	Risorsa globale (TWh/anno)	%
Moto ondoso	Attenuatori, assorbitori puntuali, OWC, overtopping	8000 - 80000	39 – 86
Correnti di marea	Turbine (asse verticale o orizzontale), profili oscillanti	800	4
Gradiente salino	Membrane semipermeabili	2000	10
OTEC (gradiente termico)	Cicli termodinamici	10000	48
Totale mondiale		20800 – 92800	100

## ✓ Energia dalle Biomasse

- lo 0.02 % dell'energia ricevuta dal Sole (26÷30 Gtep/anno) è convertita in energia chimica delle biomasse, mediante fotosintesi clorofilliana

## Fonti alternative o complementari?

Il **potenziale** di queste fonti di energia è **enorme**, ma l'energia effettivamente producibile, per motivi economici/tecnici/tecnologici/disponibilità, è piuttosto ridotta.

Quindi, con gli attuali consumi di energia, queste fonti di energia possono essere definite come "complementari" e non alternative

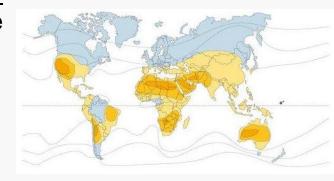
## **Energia solare (fotovoltaico)**

Descrizione: l'energia solare fotovoltaica risulta dalla trasformazione diretta della luce del sole in energia elettrica mediante celle generalmente a base di silicio. Per ottenere una potenza sufficiente, le celle sono collegate tra di loro e costituiscono il modulo, chiamato anche pannello solare. In funzione della potenza desiderata, i pannelli stessi possono essere assemblati per costituire un "campo solare fotovoltaico".



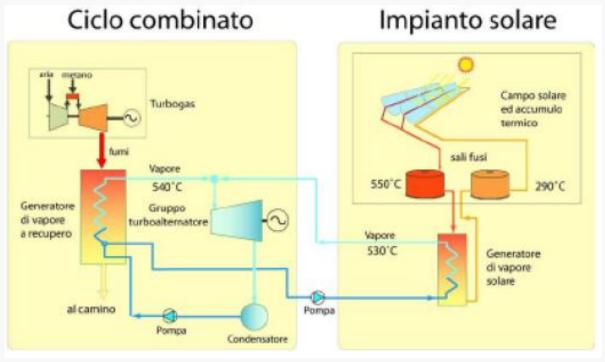
Programmabilità: la produzione di energia elettrica <u>non è</u> <u>programmabile</u>, perché dipende dalla radiazione solare incidente sui pannelli.

Impatto ambientale: non sono previste emissioni in loco, ma la tecnologia del silicio è molto impattante in fase di costruzione dei pannelli. Variazione dell'albedo.



## Energia solare (solare "termodinamico")

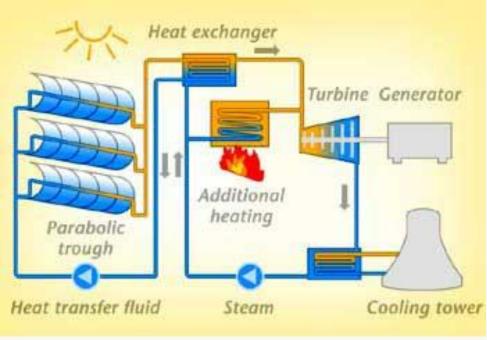




#### Energia solare (solare "termodinamico")

#### Impianto solare termodinamico in Nevada da 64 MW (Costo = 250 M)





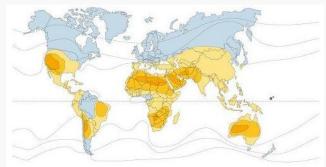
## Energia solare (solare "termico")

Gli impianti **solari termici** trasformano l'energia solare in energia termica da sfruttare per la produzione di acqua calda sanitaria, il riscaldamento ambiente, ecc.



#### **Energia solare**

#### LA SFIDA E' NELL'ABBATTIMENTO DEI COSTI



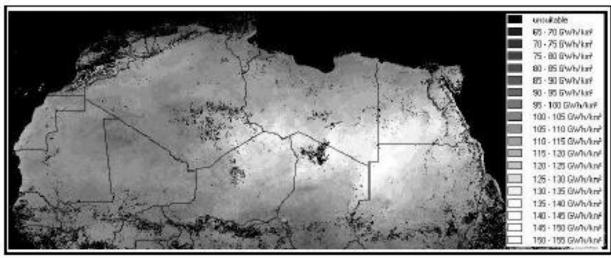


Figure 3: Annual Solar Electricity Yield of Solar Thermal Power Plants (200 MW, SEGS) in Northern Africa. Total potential 13 · 10<sup>6</sup> TWh<sub>e</sub>/year, World Electricity Demand in 1998 was 13 · 10<sup>3</sup> TWh<sub>e</sub>/year [2].

UTILIZZANDO UN MILLESIMO DELLA SUPERFICIE NORDAFRICANA SI POTREBBE PRODURRE TUTTO IL FABBISOGNO ELETTRICO MONDIALE

#### Energia eolica

Descrizione: Lo sfruttamento dell'energia eolica avviene attraverso la conversione dell'energia cinetica dell'aria in energia meccanica, in grado di azionare generatori elettrici.

Il movimento delle masse d'aria trae origine dalla differenza di pressione causata dalla differenza di temperatura in punti diversi dell'atmosfera terrestre.

Programmabilità: la produzione di energia elettrica non è programmabile, perché dipende dalla velocità del vento incidente sulle pale del generatore.

Impatto ambientale: non sono previste emissioni in loco. Non sono necessari materiali particolari per la costruzione dei generatori.

Grosso impatto visivo, inquinamento acustico e interferenze con flora e fauna.



#### Energia eolica

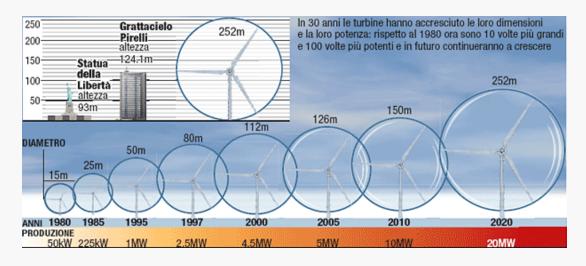
Tipo di tecnologia: Generatori eolici ad asse orizzontale (600-850 kW)

$$P_{\text{disp}} = \frac{1}{2}Mu^2 = \frac{1}{2}\rho Su^3$$

Velocità media annua in Italia = 3-6 m/s

$$P_{\rm el} = C_{\rm P} P_{\rm disp}$$
  $C_{\rm P} = 0.25 - 0.35$ 





#### Energia eolica

Potenza installata (anno 2005):

58.000 MW (mondo), 40.500 MW (Europa), 1.720 MW (Italia)

Energia prodotta (anno 2005):

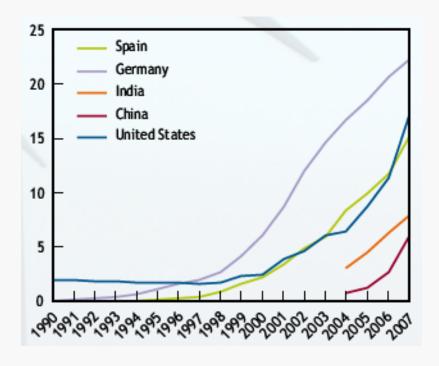
0.55 % (mondo), 2.13 % (Europa), 0.77 % (Italia)

#### Produttività:

600 kWh/anno/kW<sub>i</sub> (<u>a Ravenna</u>) 100 kW/ha

#### Costi d'impianto:

900-1200 Euro/kW<sub>i</sub> (di cui il 70% per il rotore)



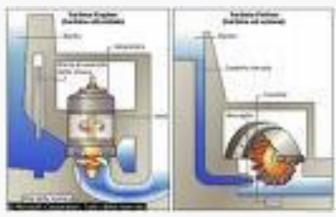
#### Energia idraulica

Descrizione: è possibile ottenere energia a partire dal movimento dell'acqua nel suo spostamento da monte verso valle (energia potenziale). Il movimento delle masse d'acqua trae origine dall'energia solare, che alimenta il ciclo dell'acqua, favorendo i fenomeni di evaporazione di grandi masse d'acqua presenti sulla superficie dei mari e degli oceani.

Programmabilità: la produzione di energia elettrica può essere programmabile, grazie alla costruzione di invasi e bacini (impianti di pompaggio).

Impatto ambientale: non sono previste emissioni in loco (nemmeno termiche). Non si utilizzano materiali particolari. Ma

- grosso impatto visivo dei bacini
- impatto acustico
- modifica della idrografia locale
- cambiamenti del micro-clima



#### Energia idraulica

Tipo di tecnologia: turbine idrauliche Pelton, Francis, Kaplan

$$P_{\rm el} = \rho \, Q \, gH \, \eta_{\rm imp}$$





	Piccola taglia	Media taglia	Grande taglia
Portata di acqua	$< 10 \text{ m}^3/\text{s}$	10-100 m <sup>3</sup> /s	$> 100 \text{ m}^3/\text{s}$
Salto lordo	< 50 m	50-250 m	> 250 m
Potenza netta	< 5 MW	5-200 MW	> 200 MW



#### Costi d'impianto:

2500-3500 Euro/kW per impianti di piccola taglia 1500-2500 Euro/kW per impianti di taglia maggiore Le opere civili hanno una grossa variabilità

condotta: 150-250 Euro/m

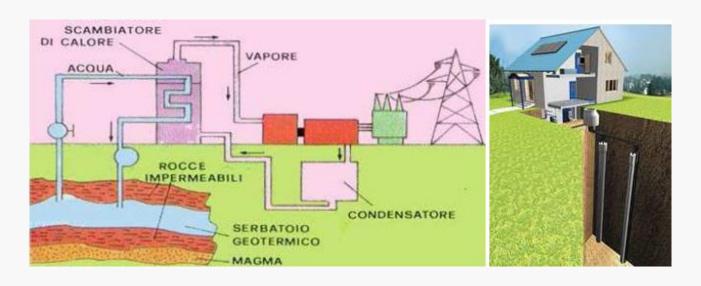
diga: 1 MEuro per una diga alta 10 m e lunga 50 m

#### Energia geotermica

Descrizione: lo sfruttamento dell'l'energia geotermica è realizzato attraverso l'estrazione di acqua calda o di vapore dal sottosuolo (con una profondità di almeno 5 km, per avere temperature di circa 150-200 °C).

Programmabilità: la produzione di energia elettrica <u>è programmabile</u>, perché la disponibilità della sorgente ad alta temperatura è in genere costante.

Impatto ambientale: impatto paesaggistico, possibili fenomeni di subsidenza, rilascio in atmosfera di gas incondensabili.



#### Energia geotermica

Produttività (2004): 9 GWe installati nel mondo (790 MW in Italia) 28 GWt

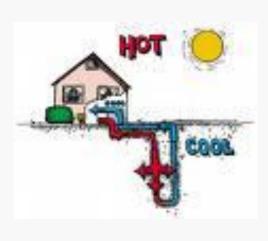
#### Costi d'impianto:

- grande taglia: 1000-1800 \$/kW (dipende dalla temperatura del vapore)

- P = 5-10 MW: 1800-2000 \$/kW

#### Geotermico domestico

#### Impianto geotermico di Larderello (Pisa)







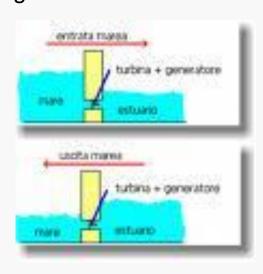
#### Energia da moto ondoso e maree

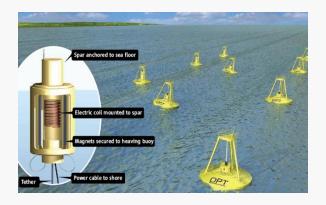
Descrizione: l'energia del moto ondoso e delle maree può essere ottenuta convertendo in energia meccanica/elettrica l'energia legata a diversi fenomeni marini (onde, maree, gradiente termico e salino).

Programmabilità: le condizioni del mare variano con regolarità e quindi sono abbastanza prevedibili.

Impatto ambientale: non sono previste emissioni in loco, ma si possono prevedere modifiche al moto ondoso, con relativo effetto su flora e fauna locale, e problemi alla navigazione costiera.





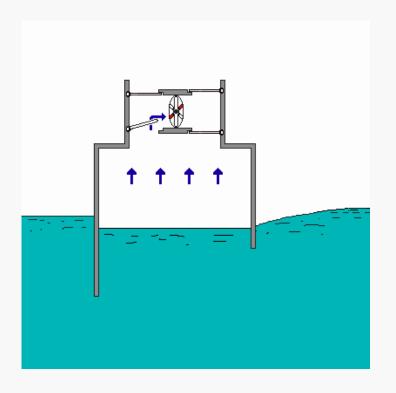


## Energia da sistemi OWC

Produttività (OWC): 4000 kWh/kW

Costo del dispositivo (OWC): 2000 Euro/kW





## Le biomasse come fonte energetica

#### **Biomasse**

 La biomassa è una fonte rinnovabile (fonte energetica non fossile) da cui si possono ricavare combustibili (biocombustibili) da utilizzare in sistemi energetici

 In campo energetico, tutte le sostanze organiche, di origine vegetale o animale da cui sia possibile ricavare energia

 La parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani

#### Perché le biomasse?

- Produzione di energia da fonte energetica rinnovabile
- Riduzione delle emissioni influenti sull'effetto serra
- Maggiore attrattività del territorio per l'insediamento di attività produttive e sostegno alle stesse
- Possibilità di utilizzare una quota parte dell'energia termica prodotta in ambito locale, con sensibile riduzione dei costi energetici ed aumento dei vantaggi ambientali
- Riduzione della dipendenza dalla rete elettrica esterna e maggiore sicurezza della fornitura
- Ricadute occupazionali dirette ed indirette (sorveglianza, pulizia, manutenzione ordinaria, raccolta e trasporto della biomassa, ecc.)

#### Perché le biomasse in Italia?

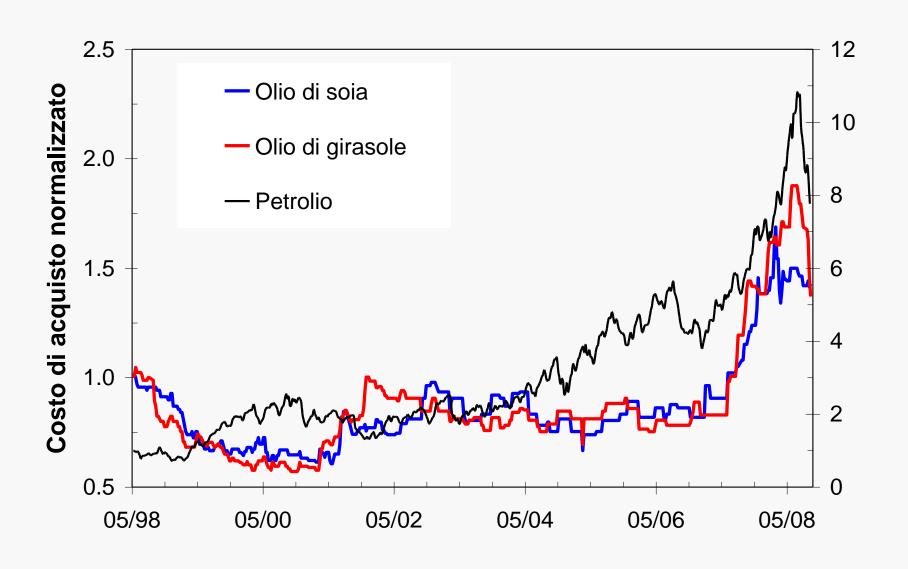
- Presenza di sottoprodotti e residui agricoli, agro-industriali e forestali, stimati in circa 24 milioni di tonnellate di sostanza secca che ogni anno devono essere smaltite in maniera corretta
- Eccedenza di superficie agricola destinata a coltivazioni alimentare, da utilizzare per coltivazioni energetiche ed industriali
- Terreni agricoli abbandonati, pari a circa 3 milioni di ettari, con alto rischio di desertificazione e di dissesto idrogeologico
- Necessità di intervento di manutenzione e riconversione del patrimonio forestale, oltre 8 milioni di ettari tra alto-fusto e ceduo
- Spopolamento e alto tasso di disoccupazione nelle aree montane

#### Perché ancora no?

- Disponibilità non elevata delle materie prime, se non in zone particolari
- Convenienza allo sfruttamento della biomassa a fini energetici solo in regioni circostanti quelle in cui questa viene prodotta (in genere in un raggio di circa 70 km)
- Costi di produzione dell'energia ancora elevati
- Taglia del sistema energetico medio-piccola (< 20 MW)</li>
- Efficienza del sistema energetico bassa (20 ÷ 25 %)
- Normativa, iter autorizzativi

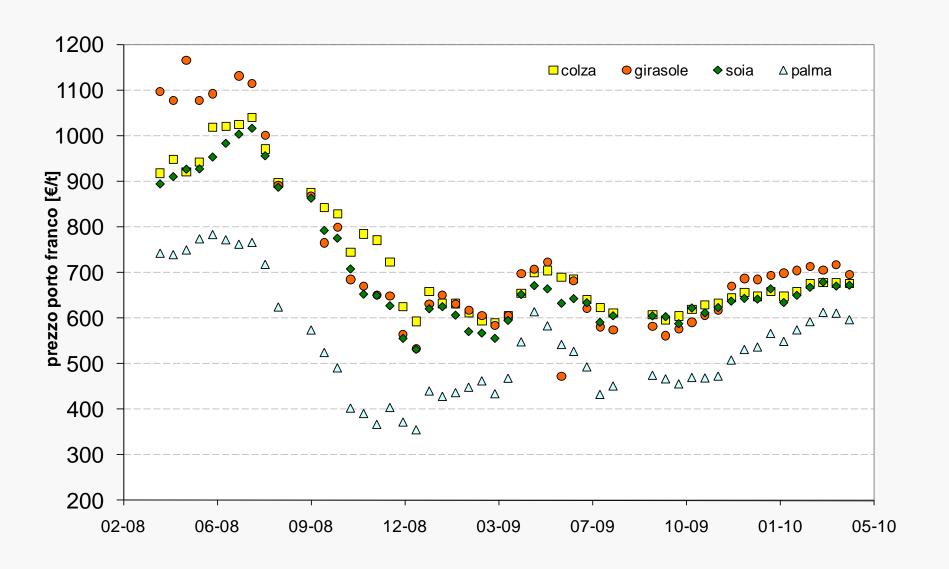
Rendimento medio parco TE			
Solidi	36.9 %		
Gas naturale	50.8 %		
Gas derivati	39.4 %		
Prodotti petroliferi	39.1 %		
Biomasse solide	19.8 %		

## Mercato degli oli vegetali



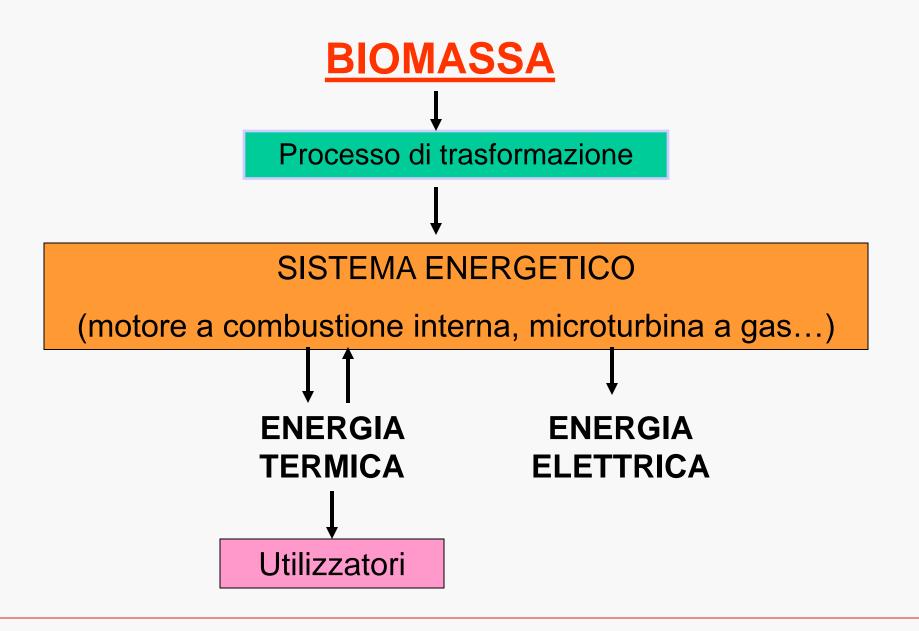
Fonte: Quotidiano Energia

## Mercato degli oli vegetali

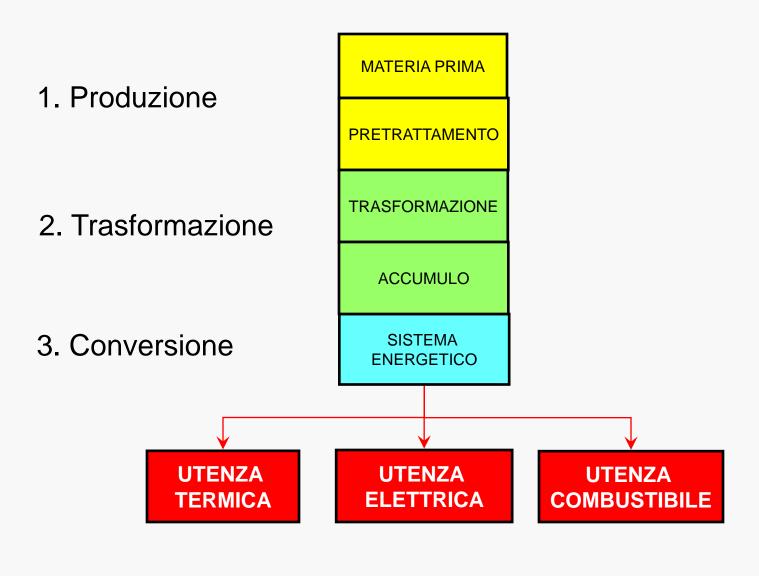


Fonte: Quotidiano Energia

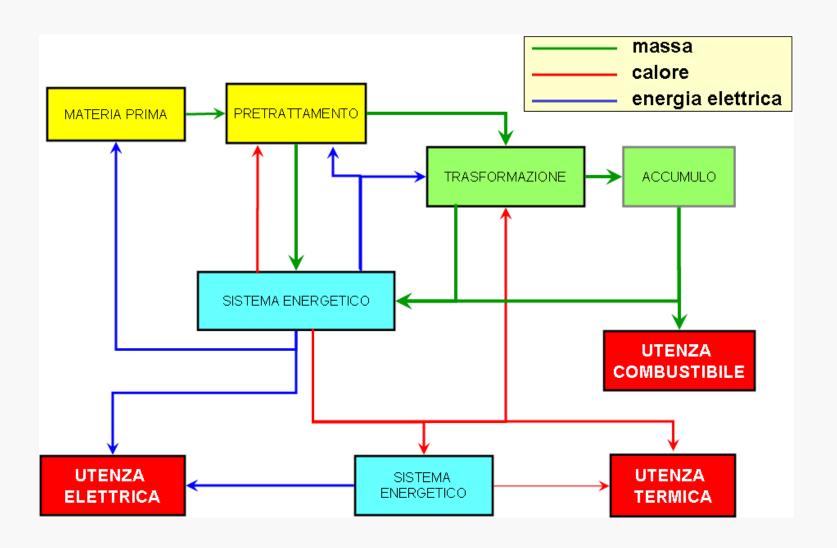
#### Flussi di energia e prodotti



#### Interazione tra flussi



#### Interazione tra flussi



#### Il problema dell'ottimizzazione

#### • Elevato numero di parametri del sistema

- Tipi di colture per produrre biomassa
- Processi di trasformazione della biomassa in prodotti no-food e combustibile
- Sistemi energetici
- · Consumo energetico di ogni fase
- Impatto ambientale

#### Sistema fisico complesso

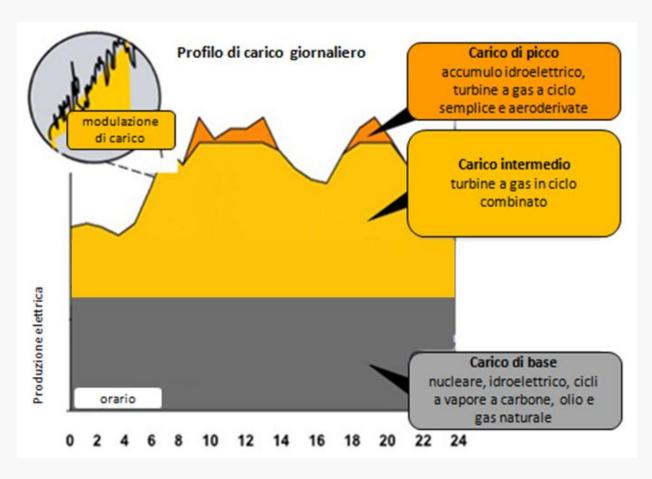
 Interazione di discipline diverse (agronomia, chimica, energetica, ingegneria di processo, impiantistica)

#### Valutazioni economiche

- Valore economico dei beni prodotti (elettricità, calore, fertilizzanti ...)
- Costo delle esternalità

# Aspetti critici legati alla diffusione delle rinnovabili

#### Il fabbisogno elettrico

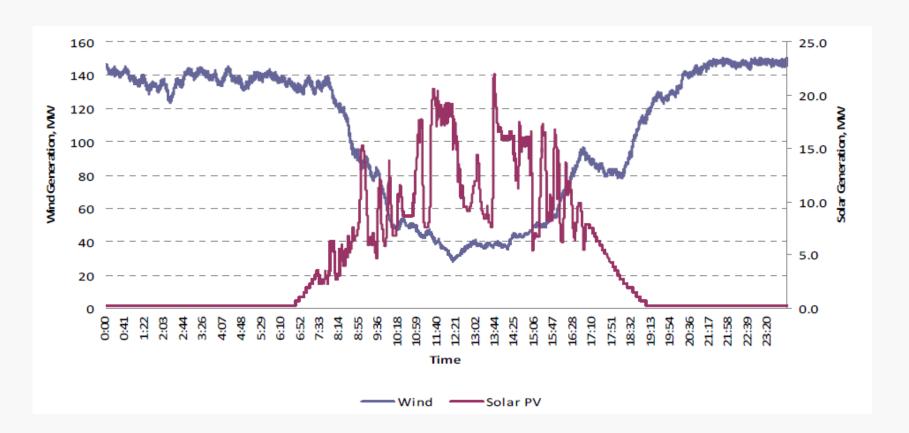


La produzione elettrica deve essere gestita in modo che domanda e offerta siano sempre in equilibrio

Le diverse tecnologie, in funzione della loro flessibilità, vanno a coprire il fabbisogno nelle varie ore della giornata

#### ... e le rinnovabili

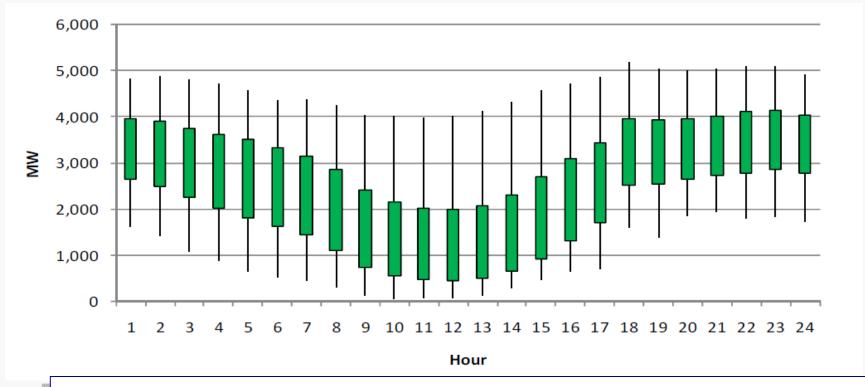
Le fonti rinnovabili non programmabili, quali eolico e fotovoltaico, rappresentano una criticità per il sistema elettrico (stabilità della rete).



#### Criticità della fonte eolica

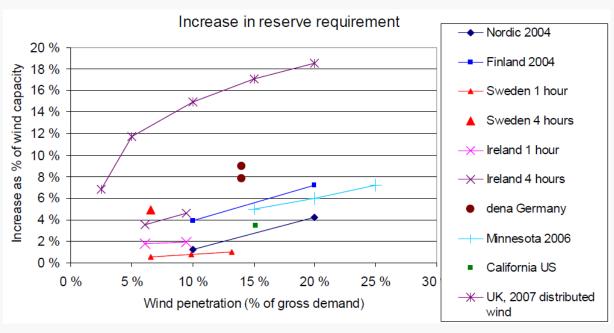
Previsione della produzione eolica in California per l'estate del 2012.

(barra verde: media  $(\pm \sigma)$ ; steli: minimo e massimo possibili)



Nelle ore di picco il contributo dell'eolico può essere da 0 a 4 GW.

#### Incremento della riserva



E' necessaria potenza di backup caratterizzata da una risposta rapida alle fluttuazioni della produzione da parte dell'eolico.

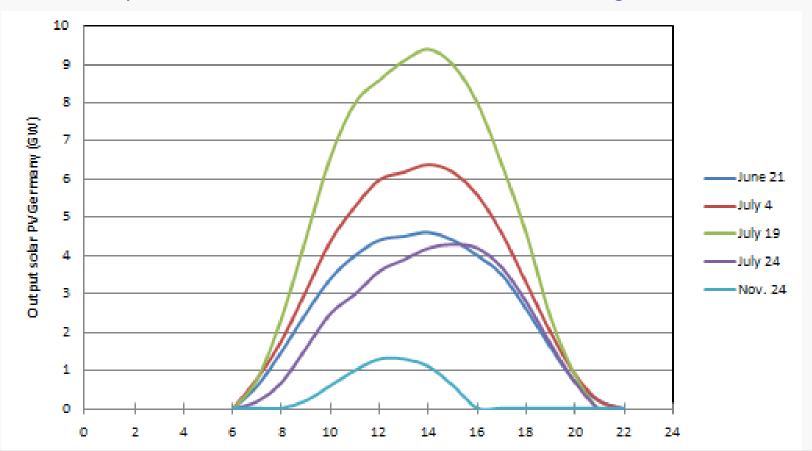
Fonte: Holttinen H, et al. "Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration" Proc. 8th Inter-country workshop on large scale integration of wind power into power systems as well as on transmission networks of offshore wind farms. Bremen; 2009.

Come regola di massima per ogni 400 MW di potenza eolica installata possono servire fino a 100 MW di potenza in riserva calda e fredda.

Fonte: ASME Paper GT2011-46484

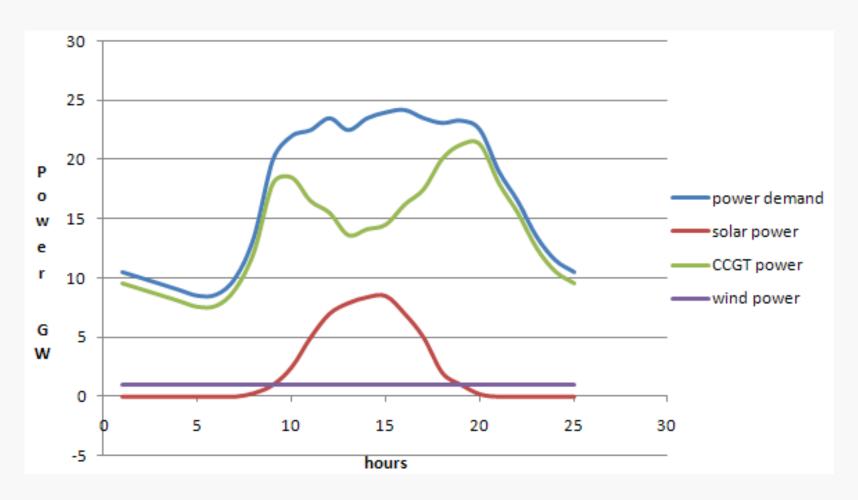
#### Criticità della fonte solare

Profili di produzione del fotovoltaico in Germania in 5 giorni del 2010



Il picco di produzione a metà giornata modifica in modo sostanziale la forma della curva di carico da coprire con le centrali a ciclo combinato

#### Modifica del profilo di carico

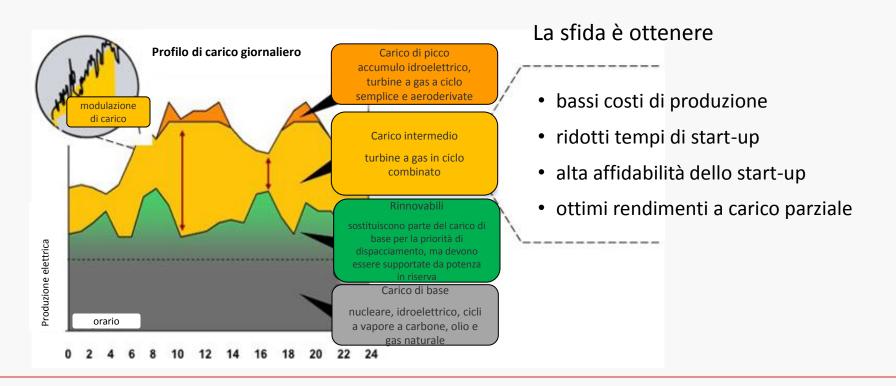


La modifica del profilo di carico può richiedere ai cicli combinati uno spegnimento e un riavvio nello stesso giorno

## Nuove esigenze per i CC

Si passerebbe da 8000 h di funzionamento e 10 accensioni all'anno a meno di 2500 ore di funzionamento con oltre 400 accensioni all'anno:

- aumento dei costi di manutenzione
- ✓ riduzione del numero di ore di funzionamento
- ✓ riduzione del rendimento complessivo a causa della modulazione.
- ✓ aumento del costo di produzione dell'energia elettrica



## Nuove esigenze per i CC

Si passerebbe da 8000 h di funzionamento e 10 accensioni all'anno a meno di 2500 ore di funzionamento con oltre 400 accensioni all'anno:

- aumento dei costi di manutenzione
- ✓ riduzione del numero di ore di funzionamento
- ✓ riduzione del rendimento complessivo a causa della modulazione.
- ✓ aumento del costo di produzione dell'energia elettrica

Le fonti rinnovabili programmabili, quali la fonte idroelettrica e i combustibili di origine rinnovabile (biomasse) che vengono utilizzati in sistemi termoelettrici convenzionali, non rappresentano una criticità, ma un'alternativa al carico di base

