



# *Il Rapporto Energia e Ambiente 2005*

---

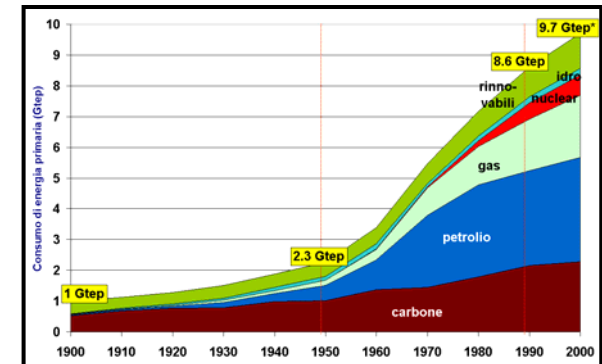
LA RICERCA IN CAMPO ENERGETICO  
**LE TECNOLOGIE DI CONVERSIONE  
DELL'ENERGIA**

*di*  
*Francesco Paolo Vivoli*

# Oltre me, hanno contribuito a questa sezione del Rapporto



- Marino Avitabile
- Giacobbe Braccio
- Francesco De Marco
- Luigi de Sanctis
- Giuseppe Girardi
- Laura Gaetana Giuffrida
- Agostino Iacobazzi
- Saverio Li Causi
- Agostino Mathis
- Domenico Mazzei
- Pietro Menna
- Stefano Monti
- Paolo Morgante
- Massimo Pezzilli
- Luciano Pirazzi
- Marina Ronchetti
- Luciano Terrinoni



## L'articolazione di questa sezione del "REA"

- L'EVOLUZIONE DELLA RICERCA NEL CAMPO DELLE TECNOLOGIE ENERGETICHE
- L'IMPIANTISTICA ENERGETICA: STATO E PROSPETTIVE DI SVILUPPO



# L'evoluzione della ricerca nel campo delle tecnologie energetiche (1/2)

*Abbiamo visto come:*

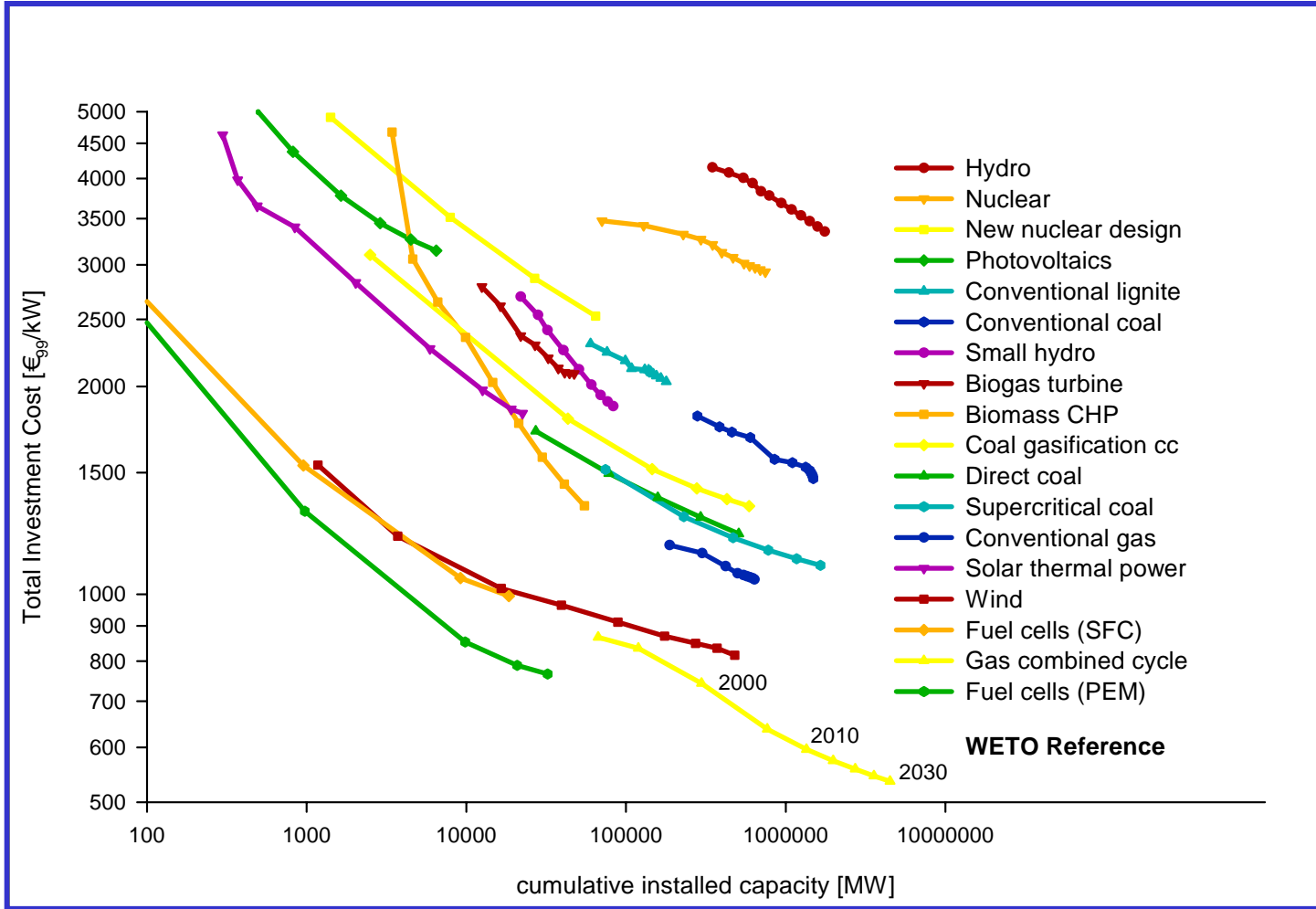
- **Lo sviluppo di sistemi e cicli avanzati** per la produzione di energia rappresentano una importante **opportunità di sviluppo tecnologico per il Paese**, in grado di rilanciare la competitività del sistema dell'offerta nazionale di tecnologie di settore
- Il **sistema** industriale nazionale **possiede** tutte le **risorse** e le **competenze** necessarie; anche se l'Italia appare in ritardo nell'impegno di ricerca
- si richiede di mettere in cantiere progetti rilevanti di **ricerca e sviluppo** nel settore delle **tecnologie energetiche** per affrontare la sfida del miglioramento delle prestazioni degli impianti, da ottenere insieme ad una drastica riduzione delle emissioni in atmosfera

# L'evoluzione della ricerca nel campo delle tecnologie energetiche (2/2)



- Oltre al prezzo e alla disponibilità di combustibili, **lo sviluppo delle tecnologie energetiche gioca un ruolo cruciale per progettare il sistema energetico futuro**
- Possediamo **capacità di modellare** lo sviluppo delle tecnologie all'interno dei modelli energetici
- Nell'ambito del programma comunitario WETO[1], **ricostruiti i "percorsi di apprendimento tecnologico" di alcune tecnologie** in fase evolutiva sulla base di dati storici fino al 2000 e delle proiezioni al 2030 di uno scenario "di riferimento"
- Nella figura di seguito sono rappresentate, con riferimento a step temporali di cinque anni, le **curve di apprendimento** che descrivono l'andamento dei costi totali di investimento delle diverse tecnologie in funzione delle capacità installate
- *[1] World Energy, Technology and Climate Policy Outlook (WETO), Commissione Europea (2003)*

# L'EVOLUZIONE DELLE TECNOLOGIE ENERGETICO-AMBIENTALI



**Costi di generazione dell'energia elettrica da varie tecnologie, in funzione della potenza installata**

**(€<sub>1999</sub>/kW)**

## LE TECNOLOGIE

*Abbiamo trattato di:*

- *tecnologie di utilizzo dei combustibili fossili*
- *tecnologie di utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili*
- *l'idrogeno come vettore energetico*



## tecnologie di utilizzo dei combustibili fossili (1/2)

È stato tracciato un Quadro sintetico delle:

- **tecnologie degli impianti termoelettrici esistenti:**
  - Cicli con turbina a vapore
  - Cicli combinati gas-vapore
- **tecnologie di frontiera o emergenti**

Nel prossimo futuro la produzione di energia elettrica si dovrà basare su **tecnologie innovative definite near zero emission**. Uno degli obiettivi è la produzione con lo stesso impianto di energia elettrica e di idrogeno. **Le tecnologie sotto osservazione sono:**

- **L'ultrasupercritico (USC):** I parametri termodinamici del ciclo vengono spinti fino a pressioni di 300-320 bar e la temperatura fino a 600-630 °C
- **Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC):** la gassificazione del carbone e l'utilizzo del syngas in un ciclo combinato (Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC) è una alternativa importante alla tradizionale combustione del polverino di carbone in caldaia
- **Combustione a letto fluido (FBC):** la combustione in letto fluido nelle sue varie forme (letto fluido a pressione atmosferica, pressurizzato, bollente o ricircolante) consiste nella combustione del carbone in un letto di materiale inerte fluidificato da un flusso di aria. È una tecnologia efficiente, vantaggiosa, dal punto di vista ambientale, per una grande varietà di applicazioni





## tecnologie di utilizzo dei combustibili fossili (2/2)

### ■ Impianti innovativi con utilizzo del gas naturale e cattura della CO2

- Occorre trattare enormi volumi di gas con notevoli costi e complicazioni impiantistiche. Esistono **una serie di cicli attualmente in fase di studio e di sperimentazione** in scala prototipale con impianti di piccola e media potenza. La CO2 separata deve poi essere raffreddata, separata dall'acqua di condensa e compressa fino a 80-90 bar con compressori interrefrigerati, per essere stoccata in fase liquida per il successivo trasporto e sequestro definitivo in apposito sito geologico.

*Lo sviluppo di molte di queste tecnologie energetiche in Italia è legato ad **accordi di collaborazione in progetti internazionali:***

- a. Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF),*
- b. Accordo di cooperazione scientifica e tecnologica Italia-Stati Uniti*
- c. Accordo di collaborazione Italia-Stati Uniti su "scienza e tecnologia dei cambiamenti climatici"*

## fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (1/8)

- ***Il fotovoltaico:*** il costo d'investimento e la producibilità di un impianto determinano il costo dell'energia elettrica prodotta mediante la tecnologia fotovoltaica.
- **L'attuale efficienza** di conversione delle celle commerciali al **silicio cristallino** è, in genere, compresa **tra il 13% e il 18%**, mentre per i moduli al **silicio amorfo** essa varia tipicamente tra il **5% e il 9%**.
- ***Le attività di Ricerca e sviluppo*** interessano:
  - La tecnologia del **silicio cristallino** (nel medio termine)
  - **film sottili in amorfo e in policristallino** (nel lungo termine)
  - **moduli a eterogiunzione**
  - **celle a bassissimo costo**, basati sull'uso di materiali organici



## fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (2/8)

### *L'eolico*

- dagli ultimi anni settanta, le **dimensioni** degli aerogeneratori e la loro **potenza e affidabilità** sono cresciuti a ritmi costanti; i costi sono diminuiti
- la potenza eolica connessa alla rete elettrica **nel mondo** è aumentata con un andamento esponenziale; ha già superato i **50.000 MW**, corrispondente a un investimento di oltre 50 miliardi di euro e a una produzione di oltre **100 TWh**, con una presenza europea superiore al 70%.
- il **costo dell'energia prodotta** si è **ridotto di un ordine di grandezza in venticinque anni**, avvicinandosi sempre più alla competitività con quello delle fonti tradizionali
- I principali "**affinamenti**" **tecnologi in corso** riguardano: le *pale in fibre di carbonio*, alleggerimento e resistenza delle parti strutturali, *rotori a diametro variabile*, sistemi di controllo innovativi



## fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (3/8)

**La biomassa:** le tecnologie mature per la sua valorizzazione energetica sono:

- **Combustione diretta:**
  - impiegata quasi esclusivamente per la produzione di energia elettrica tramite impianti di potenza media intorno ai 10 MW
  - rendimento elettrico del 20-25% e consumi specifici di biomassa di circa 1 kg/kWh
- **trasformazione in biocombustibili liquidi** (**biodiesel** da specie oleaginose e **bioetanolo** da specie zuccherine e amidacee):
  - tecnologie di produzione da colture agricole dedicate ormai consolidate, produzione in costante aumento
  - nel 2003 produzione europea -UE15- (biodiesel all'82,%) circa 1.743.500 tonnellate (1.488.680 tep), con un incremento del 26,1% rispetto al 2002
  - rispetto al 1992, la produzione di biodiesel in UE è aumentata di 26 volte, con un potenziale di impianti anche superiore (Euroobserver, 2004). L'Italia si pone al 3° posto in Europa per la produzione di biodiesel, con 273.000 tonnellate/anno (t/anno), il 30% in più rispetto al 2002, dietro Germania (715.000 t/anno) e Francia (357.000 t/anno)
- **produzione di biogas** da fermentazione anaerobica di reflui zootecnici, civili o agroindustriali



## fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (4/8)

*La biomassa:* le tecnologie vicine alla maturità

### ■ Gassificazione biomassa:

Il processo consiste nella trasformazione di un combustibile solido in combustibile gassoso i componenti combustibili presenti nel gas prodotto sono CO, H<sub>2</sub>, idrocarburi;

- Le tecnologie più diffuse sono quella a letto fisso e quella a letto fluido, la ricerca è focalizzata allo sviluppo di processi di gassificazione finalizzati a produrre gas di qualità e basso contenuto di catrami, nonché a tutta le sezioni di purificazione.

### ■ Produzione di bioetanolo da lignocellulosiche

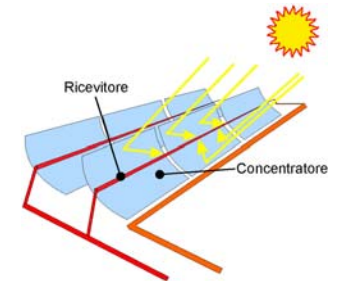
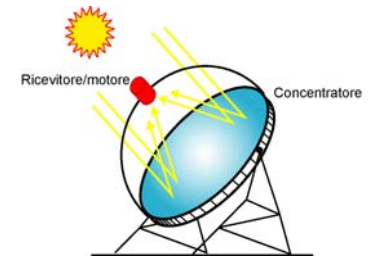
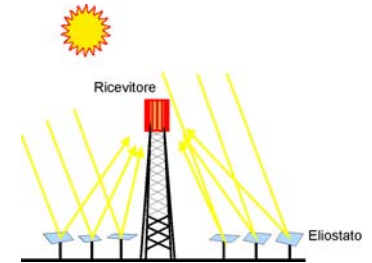
Tecnologie più distanti dalla maturità

- **gassificazione** per produzione di combustibili liquidi **sun-diesel**
- **Pirolisi** delle biomasse per produzione di biolii



## *Il solare termodinamico*

- *Tipologie di impianti*
  - Collettore a disco parabolico
  - Sistema a torre con ricevitore centrale
  - Collettore parabolico lineare



## fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (6/8)

### Collettore parabolico lineare

- questa tecnologia utilizza un concentratore lineare a profilo parabolico, la cui superficie riflettente insegue il sole ruotando su un solo asse. La radiazione solare viene focalizzata su un tubo ricevitore posizionato lungo il fuoco del concentratore parabolico in cui scorre il fluido di lavoro
- L'energia termica è utilizzata per la produzione di energia elettrica mediante i tradizionali cicli termodinamici acqua-vapore.
- la temperatura massima di funzionamento dipende essenzialmente dal fluido termovettore utilizzato; negli impianti attualmente in esercizio si arriva a circa 400 °C
- su scala industriale questa tecnologia, con i 354 MWe installati in California fra il 1984 e la fine del 1990, ha dimostrato buona affidabilità tecnica
- il costo di produzione del kWh è attualmente compreso tra 15 e 20 c\$/kWh, mentre il costo di costruzione, per un impianto da 30 MWe, è stimato in circa 3.200 \$/kWe
- il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti prevede la possibilità di scendere, entro i prossimi dieci anni, a costi di produzione intorno a 6 c\$/kWh, all'aumentare della taglia degli impianti e della potenza complessivamente installata.
- Dal punto di vista economico è ad oggi la tecnologia più conveniente fra quelle solari.

## fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (7/8)

- Il principale ostacolo al decollo di questa fonte rinnovabile a livello commerciale, è legato all'elevato costo d'investimento unitario degli impianti, da 2,5 a 4 volte superiore a quello degli impianti a combustibili fossili

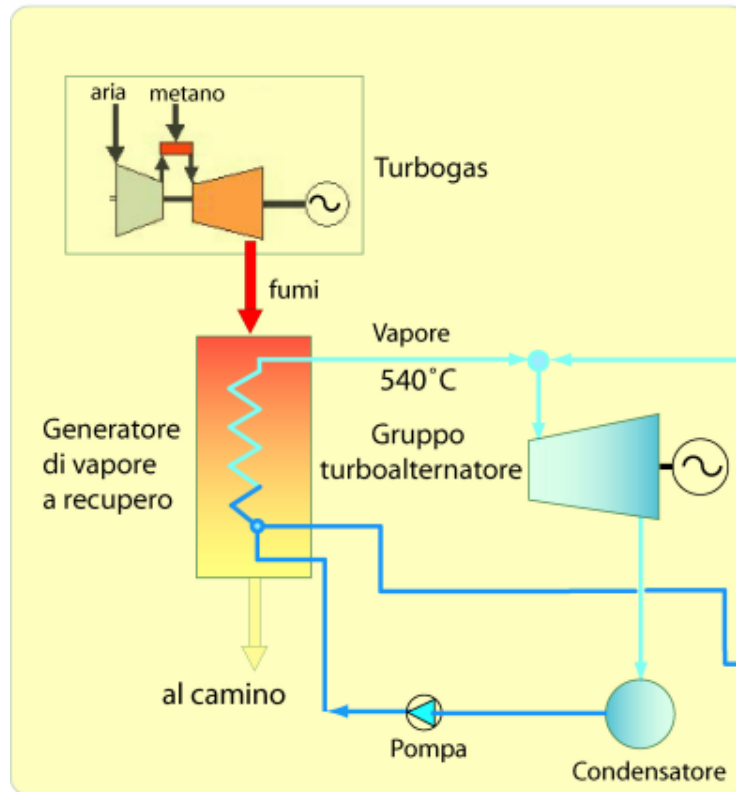
### ***Il programma dell'ENEA per la produzione di calore solare ad alta temperatura***

- Il programma di ricerca e sviluppo è finalizzato alla realizzazione di impianti solari a concentrazione in grado di fornire calore ad alta temperatura, necessario per produrre sia energia elettrica sia idrogeno mediante processi termochimici.
- l'ENEA ha sviluppato una innovativa tecnologia che si basa sull'utilizzo di un concentratore a basso costo e di un ricevitore innovativo, nonché sulla presenza di un sistema di accumulo termico a 550 °C. A tale scopo il fluido termovettore che circola all'interno dei tubi ricevitori è costituito da una miscela di sali fusi (nitrati di sodio e potassio).

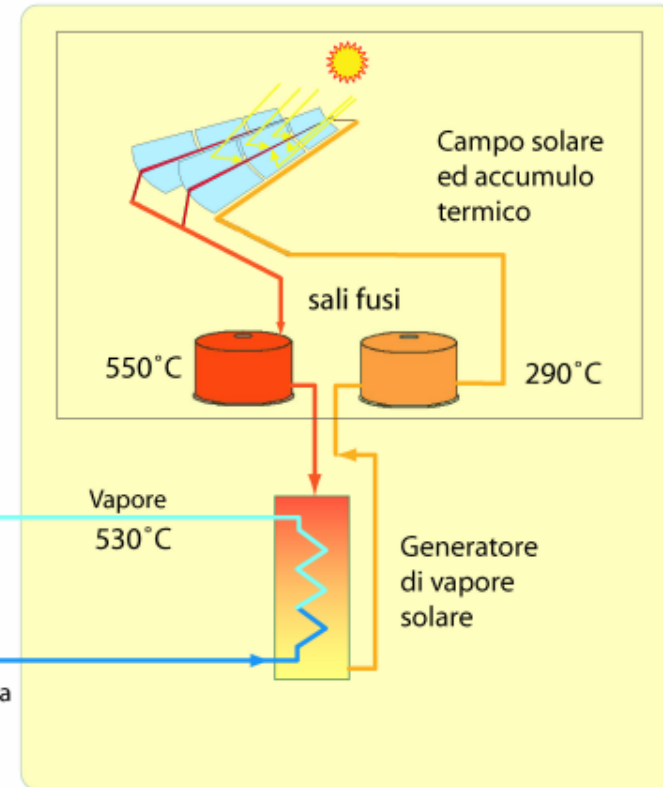


# fonti energetiche rinnovabili: le tecnologie (8/8)

## Ciclo combinato



## Impianto solare



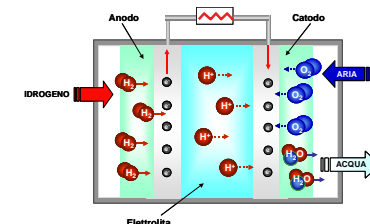
Schema dell'impianto solare termodinamico **Archimede**, progettato ad integrazione di un impianto termoelettrico a ciclo combinato, esistente in Sicilia a Priolo Gargallo (Siracusa), con un impianto solare prototipo a collettori parabolici lineari

## L'idrogeno come vettore energetico

- lo sviluppo dell'idrogeno come vettore comporta mutamenti sostanziali nel sistema energetico e richiede tempi lunghi e notevoli investimenti per lo sviluppo delle tecnologie e delle infrastrutture necessarie e per la loro graduale introduzione nel mercato
- impegnativi programmi nel settore sono in corso in Nord America, Europa e Giappone ed importanti collaborazioni internazionali vengono avviate in questa fase, come l'European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform promossa dalla Commissione Europea e l'International Partnership for Hydrogen Economy, promossa dagli Stati Uniti.
- Alla fine del 2004 il MIUR ha avviato in Italia una Piattaforma Nazionale per l'Idrogeno e le Celle a combustibile (H2CC), il cui obiettivo è promuovere la progressiva introduzione di soluzioni compatibili con l'ambiente e sostenibili per costi e qualità, basate sull'uso del vettore energetico idrogeno e delle celle a combustibile.
- La Piattaforma Nazionale si integra e si coordina negli obiettivi con quella europea e con altre collaborazioni Internazionali
- In tale quadro si inserisce l'azione dell'ENEA, che è attivo da tempo nello sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile
- l'intervento dell'ENEA nel settore dell'idrogeno riguarda:
  - lo sviluppo di tecnologie avanzate, essenziali nei settori della produzione (sia da fossili che da rinnovabili), dell'accumulo e dell'utilizzo dell'idrogeno;
  - il superamento delle barriere connesse con i problemi di sicurezza e di accettabilità delle tecnologie

## Le celle a combustibile

- le celle a combustibile sono fra i sistemi più promettenti per la produzione di energia elettrica, sia per le loro positive caratteristiche energetiche ed ambientali che per l'ampiezza delle possibili applicazioni
- la tecnologia trova impiego in settori che vanno dalla generazione distribuita per le aziende elettriche alla cogenerazione residenziale e industriale, alla generazione portatile e alla trazione.
- l'Unione Europea sostiene la ricerca sulle celle a combustibile dal 1989 e la crescente importanza che le assegna è testimoniata dal significativo aumento dei finanziamenti erogati negli ultimi anni.
- l'interesse per le celle a combustibile sta rapidamente crescendo in Italia, in linea con quanto sta avvenendo a livello internazionale. Molte iniziative sono state avviate o sono in fase di avvio da parte di strutture di ricerca, industrie, utenti, Pubblica Amministrazione.
- le linee di sviluppo dei laboratori ENEA riguardano le celle ad elettrolita polimerico, per applicazioni stazionarie e per trazione, e le celle a carbonati fusi per applicazioni stazionarie (generazione/ cogenerazione da qualche centinaio di kW a qualche decina di MW)



## Le tecnologie nucleari

### La fusione termonucleare

- nel 2005, a Mosca, i rappresentanti dell'EURATOM e di Stati Uniti d'America, del Giappone, Corea, Federazione Russa e Cina hanno concordato per la costruzione a Cadarache (Francia) del reattore sperimentale **ITER**
- è stato nominato il direttore di ITER e sono proseguiti in maniera serrata i negoziati per definire l'organizzazione e gli accordi finanziari in modo da iniziare i lavori di costruzione entro il 2006.
- L'obiettivo di ITER è di generare almeno 500 MW di potenza di fusione per almeno 400 secondi
- la costruzione di ITER durerà circa 10 anni; sono previsti 20 anni di operazione
- le attività sulla fusione nucleare in Italia si svolgono nell'ambito dell'Associazione ENEA-EURATOM che attribuisce all'ENEA la responsabilità di tutte le attività sulla fusione svolte in Italia
- L'Italia è inoltre impegnata nella progettazione di **IGNITOR**, una macchina compatta ad alto campo magnetico il cui obiettivo è di raggiungere condizioni di ignizione di miscele di deuterio e trizio, con lo scopo di studiare aspetti cruciali di fisica dei plasmi da fusione e dei futuri reattori

## Le tecnologie nucleari

### la fissione nucleare: *le nuove generazioni di reattori*

- A fronte delle nuove promettenti prospettive di mercato, l'industria elettronucleare si sta preparando a fornire nuovi tipi di reattori

*Quattro generazioni di reattori:*

1. la *prima generazione* è quella degli anni Cinquanta e Sessanta dello scorso secolo, che vide la costruzione e la sperimentazione di molti prototipi delle più varie concezioni.
2. la *seconda generazione*, nei successivi anni Settanta e Ottanta, vide la costruzione di un gran numero di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio arricchito ed acqua naturale (pressurizzata o bollente)
3. la *terza generazione* – costituita da reattori già certificati e disponibili sul mercato - comprende reattori avanzati ad acqua naturale, alcuni già in funzione in Giappone, come l'*Advanced Boiling Water Reactor* (ABWR da 1400 MWe progettato da General Electric e Toshiba) altri, come l'*European Pressurized Water Reactor* (EPR da 1.600 MWe fornito da AREVA), in fase di ordinazione.
4. Esiste poi una classe di reattori evolutivi rispetto ai precedenti – noti come reattori di *Generazione III+* o *International Near Term Deployment (INTD) Reactors* – che si prevede siano disponibili fra il 2010 e il 2015.

## Le tecnologie nucleari

### caratteristiche tipiche per i reattori di generazione III e III+ sono:

- un progetto standardizzato che abbrevi le procedure di approvazione e riduca i tempi ed i costi di costruzione;
- alta disponibilità e lunga vita utile (tipicamente, 60 anni);
- presenza di dispositivi di sicurezza di tipo "intrinseco" o "passivo";
- flessibilità nella composizione del combustibile (uranio naturale ed a vari arricchimenti, miscele uranio-plutonio, e sua alta "utilizzabilità" (*burn-up*))

### I reattori di quarta generazione, invece, sono ancora allo stadio concettuale

- dovranno rispettare i seguenti requisiti:
- sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- economicità, ovvero basso costo del ciclo di vita dell'impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- sicurezza e affidabilità; in particolare i sistemi di quarta generazione dovranno avere una bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e tollerare anche gravi errori umani; non dovranno, inoltre, richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito;
- resistenza alla proliferazione e protezione fisica contro attacchi terroristici.

# L'IMPIANTISTICA ENERGETICA: stato e prospettive di sviluppo - le tecnologie di conversione

- Le tecnologie di conversione dell'energia primaria in energia elettrica sono state trattate nei termini di **sintetica panoramica dello stato attuale e delle loro prospettive di sviluppo**, quale **strumento preliminare per analisi tecnico-economiche del settore** che però, ai fini di scelte strategiche, richiede ovviamente ulteriori approfondimenti

LE TECNOLOGIE DI CONVERSIONE DA COMBUSTIBILI FOSSILI	
<i>FONTE PRIMARIA</i>	<i>TECNOLOGIA/IMPIANTO</i>
OLIO COMBUSTIBILE	Ciclo a vapore ad olio combustibile
CARBONE	Ciclo a vapore a polverino di carbone (Pulverised Coal Combustion – PCC)
	Ciclo combinato con gassificazione integrata del carbone (Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC)
	Ciclo a vapore supercritico a polverino di carbone (supercritical PCC)
GAS NATURALE	Cicli combinati gas-vapore alimentati a gas naturale (NGCC)

# Le tecnologie di conversione

<b>TECNOLOGIE DI CONVERSIONE "ZERO EMISSION"</b>	
<i>FONTE PRIMARIA</i>	<i>TECNOLOGIA/IMPIANTO</i>
CARBONE	Ciclo combinato con gassificazione integrata del carbone, cattura della CO <sub>2</sub> e produzione di idrogeno (IGCC Zero Emission)
GAS NATURALE	Ciclo Combinato gas-vapore, alimentato a gas naturale, con cattura della CO <sub>2</sub> a valle della combustione
GAS o COMBUSTIBILI CONTENENTI CARBONIO	Celle a combustibile alimentate ad idrogeno per usi stazionari e per trazione
	Celle a combustibile alimentate da combustibili contenenti carbonio

<b>LE TECNOLOGIE DI CONVERSIONE DA FONTI RINNOVABILI</b>	
<i>FONTE</i>	<i>TECNOLOGIA/IMPIANTO</i>
SOLE	Fotovoltaico per utenze isolate
	Fotovoltaico per il collegamento alla rete
	Fotovoltaico a concentrazione
VENTO	Eolico per applicazioni di bassa potenza ( <i>minieolico</i> )
	Eolico on-shore
	Eolico off-shore
ACQUA	Impianti idroelettrici
	Mini idraulica
SOLE	Sistemi a collettore parabolico lineare ( <i>parabolic trough</i> )
	Sistemi a torre solare ( <i>solar tower</i> )
	Sistemi a disco parabolico ( <i>parabolic dish</i> )
BIOMASSE	Ciclo combinato alimentato a gassificazione da biomasse ( <i>CHP</i> )

# Le tecnologie di conversione

## LE TECNOLOGIE NUCLEARI DI CONVERSIONE

<i>FONTE PRIMARIA</i>	<i>TECNOLOGIA/IMPIANTO</i>
Nucleare	Centrali nucleari ad acqua pressurizzata ( <i>PWR</i> )

<i>A PARTIRE DA</i>	<i>PRODUZIONE DI</i>
COMBUSTIBILE FOSSILE	Idrogeno
FONTE RINNOVABILE	Idrogeno
BIOMASSE	Biocombustibili liquidi ( <i>etanolo e biodiesel</i> )
SOLARE	Energia termica a bassa temperatura

**Per ogni tecnologia/impianto** è stata realizzata **una scheda descrittiva** evidenziando: l'evoluzione nel tempo e i dati tecnico-economici caratteristici della tecnologia:

- Costo Investimento
- Costi fissi e Costi variabili di O&M
- Efficienza elettrica
- Combustibile utilizzato
- Efficienza termica



# Le tecnologie di conversione

## Carbone

**TECNOLOGIA:** Ciclo combinato con gassificazione integrata del carbone  
(Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC)

**DESCRIZIONE:** Consiste nel portare il carbone (iniettato secco o sotto forma di *slurry*) ad elevata temperatura a contatto con vapore ed ossigeno. Tramite reazioni chimiche viene prodotto un gas che, previa depurazione, viene utilizzato come combustibile in un ciclo combinato gas-vapore. Lo zolfo presente nel carbone può essere quasi completamente recuperato in forma commerciale e le ceneri sono convertite in scorie vetrificate ambientalmente inerti. Rappresenta un'alternativa al sistema tradizionale di combustione del carbone con notevoli miglioramenti in termini di efficienza e di emissioni. In genere viene richiesto l'impiego di carboni di alto rango a basso contenuto di ceneri e comunque questi impianti, una volta realizzati, sono poco adatti all'utilizzo di carboni di caratteristiche diverse.

**TIPOLOGIA DIMENSIONALE IMPIANTI:** 100-350 MW  
> 500 MW

**STATO E PROSPETTIVE:** la competitività economica degli impianti di gassificazione a carbone e ciclo combinato non è ancora stata raggiunta anche se è già possibile segnalare numerose realizzazioni di notevole impegno ed interesse industriale. Nel periodo 1980-1990 sono stati realizzati, in Europa (Olanda e Spagna) e Stati Uniti, sette progetti dimostrativi funzionanti con taglie comprese tra 100 e 350 MW. Altri due progetti, riguardanti impianti di 400 e 800 MW, sono in programma negli Stati Uniti per il periodo 2004-2006.

Un altro progetto di gassificazione è stato attuato nel 2004 nella provincia cinese dell'Hunan. A livello nazionale si segnala il progetto Sulcis in Sardegna non ancora attivato e la partecipazione ENEL al Progetto europeo di gassificazione di Puertollano che vede coinvolte le maggiori imprese europee (EDF, EDP, ENDESA, NP).

Data l'esperienza accumulata e la standardizzazione delle tecniche di produzione, si prevede per i prossimi anni una riduzione dei costi d'investimento e di manutenzione. Ulteriori aspetti che necessitano attenzione dal punto di vista del miglioramento tecnologico riguardano l'affidabilità e la disponibilità degli impianti che ancora non hanno raggiunto livelli ottimali.

### DATI TECNICI ED ECONOMICI

	Unità di misura	600 MW		
		2000	2005	2015
Combustibile utilizzato		Carbone	Carbone (*)	Carbone (*)
Efficienza elettrica	%	n.d.	40,0	46,0
Vita impianto	anni	n.d.	35	35
Costo investimento	€/kW	n.d.	1.378	1.072
Costi fissi O&M	€/kW/a	n.d.	48	38
Costo del Combustibile	c€/kWh	n.d.	1,84	1,60
Emissioni CO <sub>2</sub>	kg/MWh	n.d.	880	765
Stato della tecnologia		prototipo	industriale	industriale

(\*) Si impiegano carboni di diverse qualità; da ligniti a carboni di alto rango, comunque ogni impianto è adatto all'utilizzo di un solo tipo di combustibile

Fonte: elaborazione ENEA su dati DOE, WEC, IEA e JRC-IPTS

## Eolico

**TECNOLOGIA:** Eolico per applicazioni di bassa potenza (minieolico)

**DESCRIZIONE:** il tipico impianto "minieolico" è costituito da un singolo aerogeneratore, al quale, nel caso di utenze non connesse alla rete elettrica, è abbinato un sistema di accumulo elettrico o altro dispositivo per assicurare al carico la continuità dell'alimentazione. Le applicazioni più ricorrenti afferiscono alle utenze domestiche, artigianali e, in particolare, a quelle agricole; in quest'ultimo caso, infatti, l'impiego di una risorsa energetica locale inesauribile e ampiamente diffusa nelle aree rurali rappresenta un valore aggiunto in termini di redditività. La potenza dell'impianto varia da qualche kW a qualche decina di kW (difficilmente si raggiungono i 100 kW di potenza mediante un singolo aerogeneratore). Altre applicazioni alquanto frequenti riguardano la navigazione da diporto, la protezione catodica e il settore delle telecomunicazioni (con taglia tipica 50 W - 1 kW). Al fine di migliorare la continuità della fornitura di energia, la generazione da fonte eolica viene integrata con un'altra fonte rinnovabile (per esempio fotovoltaico) o convenzionale (per esempio uno o più gruppi diesel). In questo caso si parla di un sistema ibrido.

**TIPOLOGIA DIMENSIONALE IMPIANTI:** da qualche decina di Watt a 100 kW

**STATO E PROSPETTIVE:** la tecnologia di realizzazione dei generatori eolici di piccola taglia ha oggi raggiunto un buon livello di prestazioni, in termini di disponibilità ed affidabilità, a costi che rendono questa applicazione sempre più accessibile. Si può quindi immaginare, in prospettiva, un ampio uso di questa fonte anche in Italia, sia come supporto a utenze comunque servite dalla rete elettrica, anche in ambito rurale, sia in quei contesti dove l'accesso alla rete avrebbe costi proibitivi.

### DATI TECNICI ED ECONOMICI \*

		50 W - 100 kW		
		2000	2005	2015
Efficienza elettrica	%	40,0-45,0	40,0-45,0	40,0-0,0
Vita impianto	anni	20	20	20
Costo Investimento (CI)	€/kW	2.000-3.000	1.500-2.500	1.000-2.000
Costi fissi O&M	% del CI	2-3%	2-3%	1,5-2%
Emissioni CO <sub>2</sub>	kg/MWh	0	0	0
Stato della tecnologia		industriale	industriale	industriale

I dati si riferiscono alle sole applicazioni in connessione alla rete

Fonte: studi ENEA e dati internazionali di origine diversa

# Le tecnologie energetiche a confronto: i costi dell'energia prodotta

- **un parametro significativo di confronto** è certamente il costo dell'unità di energia elettrica prodotta relativo a ciascuna tecnologia.
- *nessun metodo* di stima di tale costo *riflette correttamente e in modo esaustivo gli aspetti economici della produzione di energia*: la ragione principale è che non è possibile rappresentare con un solo numero finale tutti i fattori, variabili nel tempo di vita utile degli impianti, che contribuiscono alla determinazione del costo
- *al fine di effettuare confronti economici tra varie tecnologie,*
- si è scelto di utilizzare **il metodo** del cosiddetto “**costo medio livellato dell'unità di energia elettrica**” utilizzato in sede internazionale ed approvato dall'IEA, definito come:
- *“quel costo medio nella vita dell'impianto che, moltiplicato per l'energia mediamente prodotta in un anno, uguaglia la rata annuale costante di un piano di ammortamento del capitale investito inizialmente e di quello speso per l'esercizio e la manutenzione, esteso all'intera vita produttiva”.*

## i costi dell'energia prodotta

### METODO DI CALCOLO DEL COSTO MEDIO LIVELLATO DELL'UNITÀ DI ENERGIA ELETTRICA

- Il calcolo utilizza l'espressione:
- $C_{kWh} = (C_i * A + C_m + C_f) / N$

dove:

- $C_{kWh}$  rappresenta il "costo medio livellato del kWh"
- $C_i$  = costo di investimento
- $A$  = fattore di attualizzazione dell'investimento
- $C_m$  = costi annui fissi e variabili, operativi e di manutenzione (O & M)
- $C_f$  = costo annuo del combustibile
- $N$  = numero di kWh prodotti in un anno
- Il fattore  $A$  di attualizzazione dipende dalla vita "t" dell'impianto e dal tasso d'interesse "r" [1], ed è valutabile mediante l'espressione:  $A = r / (1 - (1 + r)^{-t})$

[1] Convenzionalmente in questo genere di valutazioni si utilizza un tasso d'interesse  $r = 5\%$

# I costi dell'energia elettrica dalle diverse tecnologie

**CONFRONTO DI COSTI DELL'ENERGIA ELETTRICA (calcolata con il metodo del costo medio livellato) PRODOTTA CON TECNOLOGIE CHE UTILIZZANO DIVERSE FONTI E RELATIVE EMISSIONI DI CO<sub>2</sub>**

TECNOLOGIE ENERGETICHE / FONTI	Taglia dell'impianto preso a riferimento	Fattore di carico FC	Costo del kWh medio livellato (2005)	Emissione di CO <sub>2</sub> stimata	Note
	MW	---	c € / kWh	ton/MWhe	
<b>DA COMBUSTIBILI FOSSILI FOSSILI</b>					
Ciclo a vapore ad olio combustibile	660	0,8	6,5	0,65	
Ciclo a vapore a polverino da carbone	330	0,8	3,3	0,89	
Ciclo combinato con gassificazione integrata del carbone (IGCC)	660	0,8	3,7	0,85	
Ciclo a vapore supercritico a polverino di carbone (Supercritical PCC)	900	0,8	3,1	0,77	
Cicli combinati gas-vapore alimentati a gas naturale (NGCC)	800	0,8	4,2	0,35	
<b>"ZERO EMISSION" o "QUASIZERO EMISSION"</b>					
Ciclo combinato con gassificazione integrata del carbone, cattura della CO <sub>2</sub> e produzione di idrogeno (IGCC Zero Emission)			n d		Tecnologia preindustriale in fase di studio
Ciclo combinato gas-vapore, alimentato a gas naturale, con cattura della CO <sub>2</sub> a valle della combustione			n d		Tecnologia preindustriale in fase di studio
<b>CELLE A COMBUSTIBILE</b>					
Celle a combustibile alimentate ad idrogeno per usi stazionari e per trazione			n d		Tecnologia allo stato di prototipo
Celle a combustibile alimentate da combustibili contenenti carbonio			n d		Tecnologia allo stato di prototipo
<b>DA FONTI RINNOVABILI</b>					
Fotovoltaico per utenze isolate	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-2</sup>	0,15	62 - 88	---	Italia centrale
Fotovoltaico per il collegamento a rete	10 <sup>-3</sup> - 5	0,15	33 - 43	---	Italia centrale
Fotovoltaico a concentrazione	0,1 - 10	0,30	22 - 28	---	Italia centrale
Eolico per applicazioni bassa potenza (minieolico)	5x10 <sup>-5</sup> - 0,1	0,20	9 - 16	---	
Eolico onshore	1 - 100	0,25	4 - 6	---	
Eolico offshore	20 - 500	0,40	4 - 6	---	
Impianti idroelettrici	> 10	0,5	2	---	
M in idraulica	< 10	0,6	1,5	---	
Sistemi a collettore parabolico lineare	30 - 400	0,53	n d	---	Tecnologia allo stato di prototipo
Sistemi a torre solare	10 - 200	0,78	n d	---	Tecnologia allo stato di prototipo
Sistemi a disco parabolico	10 <sup>-2</sup>	n d	n d	---	Tecnologia allo stato di prototipo
Ciclo combinato alimentato a gassificazione da biomasse (CHP)	5 - 25	0,8	7	-	
<b>DA NUCLEARE</b>					
Centrali nucleari ad acqua pressurizzata	1560	0,85	2	---	

# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

**PER CHIARIMENTI O APPROFONDIMENTI SULLE  
DIVERSE TECNOLOGIE**

**I COLLEGHI CHE HANNO CONTRIBUITO ALLA  
PREPARAZIONE DI QUESTA SEZIONE DEL  
RAPPORTO ENERGIA AMBIENTE SONO ORA  
DISPONIBILI**

*Francesco Paolo Vivoli*

*Centro Ricerche Casaccia  
Email: [vivoli@casaccia.enea.it](mailto:vivoli@casaccia.enea.it)*

*UTS  
Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi*