

# 11 Le fonti di energia

## Prerequisiti

- Saper riconoscere i diversi tipi di macchine e impianti.
- Saper valutare il rendimento di macchine e impianti.
- Conoscere il significato di conversione diretta e conversione ciclica da una forma di energia a un'altra.
- Saper riconoscere la qualità dell'energia.

## 11.1 Energia primaria

Le risorse energetiche sono rappresentate dalle **fonti di energia primaria** (*primary energy sources*) dalle quali si ottiene direttamente, oppure più spesso mediante ulteriori conversioni, l'energia effettivamente utilizzata dalla società. Esempi di conversione dell'energia primaria in forme più convenienti di energia (secondaria) sono, ad esempio, l'energia elettrica e i combustibili raffinati usati nell'autotrazione, che costituiscono quei portatori di energia (*energy carriers*) senza i quali non sarebbe possibile l'uso dell'energia primaria. Le fonti di energia si classificano in fonti:

- *non rinnovabili (nonrenewable)*, come quelle derivate dai combustibili fossili (petrolio, carbone e gas naturale) e dai combustibili nucleari (uranio): queste fonti, che sono purtroppo le più utilizzate, sono limitate in natura e sono quindi destinate a esaurirsi più o meno rapidamente a seconda dell'intensità del loro sfruttamento;
- *rinnovabili (renewable)*, come l'energia dell'acqua (idrica), del vento (eolica)<sup>11.1</sup>, del sole (solare) e delle regioni ad alta temperatura del sottosuolo (geotermica): sono fonti non limitate la cui utilizzazione è condizionata soltanto dall'efficienza con cui vengono captate. Anche le biomasse, residui di origine vegetale o animale come, ad esempio, i rifiuti urbani, vanno compresi nelle risorse rinnovabili.

Le diverse fonti vengono confrontate tra loro sulla base dell'energia  $E$  misurata in joule [J] e multipli relativi. Per un combustibile (*Tabella 11.1*), l'energia  $E$  [MJ] è data dal prodotto della massa  $m$  del combustibile [kg] per una quantità chiamata potere calorifico  $HV$  (*heating value*)<sup>11.2</sup> [MJ/kg], che rappresenta il contenuto di energia (1 megajoule [MJ] =  $10^6$  J) riferito all'unità di massa [kg]. La potenza  $P$  è poi data (1-13) dall'energia  $E$  diviso il tempo  $t$ .

$$E = m \cdot HV \quad \text{e} \quad P = \frac{E}{t} \quad 11-1$$

**11.1** - L'aggettivo eolico significa "proprio del vento" oppure "dovuto al vento"; l'energia eolica è perciò l'energia dovuta al vento, mentre la centrale eolica è la centrale che sfrutta l'energia del vento. Deriva da Eolo che, nella mitologia greca, è il re dei venti. Nelle parole composte si usa spesso il termine "anemo" (dal greco *anemos*: vento); abbiamo, ad esempio, anemometro (misuratore della velocità del vento) e centrale anemoelettrica (centrale per convertire l'energia del vento in energia elettrica).

**11.2** - Se non altrimenti specificato, per potere calorifico  $HV$  di un combustibile si intende il potere calorifico inferiore  $LHV$  (*Low Heating Value*).

Data l'importanza del petrolio, è uso esprimere le diverse forme di energia primaria anche in un'unità basata sulla quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio. Quest'energia (*Tabella 11.1*) è stata posta convenzionalmente pari a 41,868 GJ (gigajoule), si chiama tonnellata equivalente di petrolio e si indica con il simbolo [toe]<sup>11.3</sup>. Così, ad esempio, l'energia fornita da una massa di petrolio di 2 Mg (tonnellate) sarà pari a 2 toe.

*Tabella 11.1*

**Trasformazione di unità di uso corrente nel campo dei combustibili fossili**

1 barile di petrolio = 0,159 m <sup>3</sup> = 136,4 kg
1 miliardo di barili di petrolio = 10 <sup>9</sup> × 136,4 kg = 0,1364 × 10 <sup>12</sup> kg
1 toe = energia equivalente a 1 tonnellata di petrolio = 1000 kg × 41,868 MJ/kg = 41,868 GJ (gigajoule)
1 Mtoe (1 milione toe) = 10 <sup>6</sup> × 41,868 GJ = 10 <sup>6</sup> × 41,868 × 10 <sup>9</sup> J = 41,868 × 10 <sup>15</sup> J = 41,868 PJ (petajoule) = 41,868 × 10 <sup>-3</sup> EJ (exajoule). <i>Normalmente la quantità 41,868 viene arrotondata a 42</i>
1 miliardo di m <sup>3</sup> di gas naturale = 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
Energia equivalente a 1 miliardo di m <sup>3</sup> di gas naturale = 36 × 10 <sup>15</sup> J = 36 PJ (petajoule) = 0,036 EJ (exajoule) = 0,860 Mtoe (million toe)
1 ton = 1 Mg; 1 miliardo di tonnellate di carbone = 10 <sup>9</sup> Mg
Energia equivalente a 40 tonnellate di antracite ( <i>HV</i> = 25,000 MJ/kg) oppure a 95 tonnellate di lignite e carbone bituminoso ( <i>HV</i> = 10,526 MJ/kg) ≈ 1 EJ (exajoule)

A parte l'acqua di fiumi e di bacini da tempo utilizzata per la produzione di energia elettrica, le altre fonti rinnovabili vanno considerate *innovative*; pur avendo un potenziale enorme (*Figura 11.1*), esse non sono state infatti utilizzate fino ad ora su larga scala perché:

- si tratta di sorgenti non concentrate (si pensi non solo al solare e all'eolico ma anche alle biomasse e ai rifiuti urbani);
- richiedono impianti di costi e investimenti molto alti con ritorni dopo parecchi anni (si pensi agli impianti per sbarramento di marea);
- hanno rendimenti in genere non elevati essendone stato in passato trascurato lo sviluppo a causa del basso costo dell'energia prodotta da combustibili non rinnovabili e per la ridotta sensibilità verso le problematiche ambientali.

---

**11.3** - Si è preferito indicare, perché usata nell'Unione Europea, l'equivalente della tonnellata di petrolio con il simbolo [toe] (*tonne of oil equivalent*) anziché con quello italiano [tep] che sta per tonnellata equivalente di petrolio. Data la variazione del potere calorifico al variare del tipo di combustibile, il fattore di conversione tra GJ e toe dovrebbe assumere valori leggermente diversi ogni volta che viene cambiato il petrolio di riferimento. Trattandosi comunque di una convenzione, si è posto, in questo corso, 1 toe = 41,868 GJ (*Statistical Review of World Energy* pubblicata dalla British Petroleum).

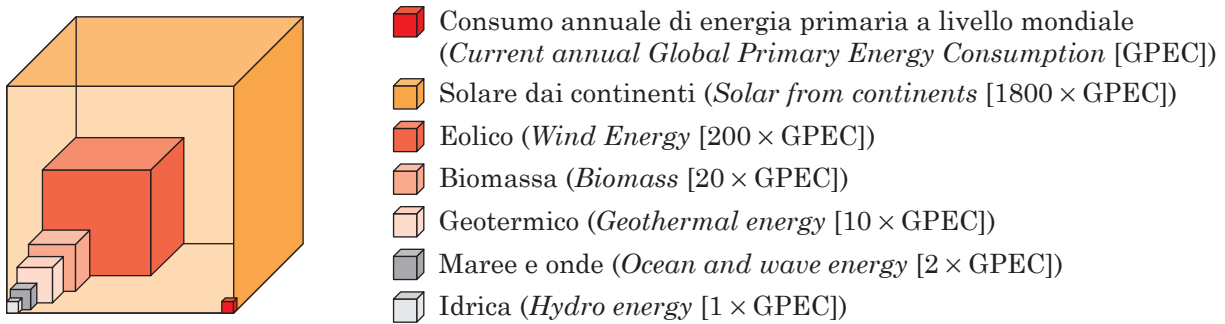


Fig. 11.1 - Potenziale teorico delle principali fonti di energia rinnovabile confrontato con l'attuale consumo di energia primaria a livello mondiale (F. Nitsch).

Il progressivo aumento della domanda di energia porta a sviluppare conoscenze e tecnologie che consentano, da una parte, di utilizzare sempre nuovi giacimenti delle risorse non rinnovabili realizzando più elevati rendimenti nei processi di estrazione e, dall'altra parte, di espandere il più possibile le fonti di energia rinnovabile puntando su costi più contenuti di quelli attuali. Il rapporto tra l'energia resa da un impianto nella sua vita media e l'energia investita (in lavoro, macchinari, impianti, manufatti, trivellazioni, servizi ecc.) per costruirlo e mantenerlo permette di sapere se conviene sviluppare una data fonte. Il rapporto Energia resa/Energia investita è il ritorno energetico sull'energia investita (*Energy return on energy invested*). Fonti energetiche che presentano un valore inferiore a 1 sono energeticamente in perdita: esse non possono essere considerate fonti primarie di energia poiché per il loro sfruttamento si spende più energia di quanto se ne ricavi. Un valore alto del rapporto, ad esempio superiore a 50 come nel caso della centrale idroelettrica della *Figura 11.3*, significa che l'energia ricavata supera di più di 50 volte il costo di tutta l'energia spesa per arrivare a ottenerla. Questa valutazione va fatta su base locale: il rapporto può essere molto basso, attorno a 5 per i biocombustibili prodotti in USA a causa dell'elevato uso di energia richiesto per le coltivazioni, mentre così non è per i biocombustibili prodotti in Brasile. La valutazione inoltre dovrebbe tener conto anche dell'inquinamento associato all'uso di una data fonte; ad esempio, il rapporto tra energia resa ed energia investita del carbone risulta molto alto (tra 40 e 80 al passare da una miniera ad un'altra) proprio perché non si tiene conto dei costi degli investimenti necessari per limitarne l'impatto ambientale e climatico.

## 11.2 Energia da fonti fossili: petrolio, gas e carbone

L'aria è composta principalmente da un gas inerte, l'azoto ( $N_2$ ), e da ossigeno ( $O_2$ ) che, nella combustione, reagisce con il carbonio (C) e l'idrogeno ( $H_2$ ) dei combustibili fossili (*fossil fuels*), producendo vapor d'acqua ( $H_2O$ ) e biossido di carbonio ( $CO_2$ ); quest'ultimo è particolarmente attivo nel determinare l'aumento della temperatura dell'atmosfera con gravi ripercussioni sull'ambiente.

È il **petrolio** (*oil*) la fonte di energia più utilizzata nei Paesi maggiormente industrializzati in quanto è stata fino ad ora la fonte economicamente più conveniente ed, essendo liquido, più facilmente trasportabile (*Tabella 11.2*). L'esaurimento del petrolio è previsto in circa 50 anni sulla base delle risorse già accertate e circa 60 ÷ 70 anni se si fa riferimento alle risorse stimate. Queste sono legate alla scoperta di nuovi giacimenti oppure allo sfrut-

tamento di giacimenti già individuati, ma attualmente di difficile utilizzazione, il cui maggior costo di estrazione verrebbe coperto da un più alto prezzo del petrolio. Questa fonte presenta l'inconveniente di provenire per la maggior parte (65%) da una sola area politica (Medio Oriente) e, come tale, è esposta a crisi, come è già avvenuto in passato, che rendendone difficile l'approvvigionamento, potrebbero determinare il collasso delle economie basate su una sola fonte energetica.

Il componente principale del **gas naturale** (*natural gas*) è il metano ( $\text{CH}_4$ ), solitamente in concentrazione maggiore del 90% in volume. Essendo caratterizzato da una migliore distribuzione geopolitica perché presente in molti altri Paesi e non solo in Medio Oriente (*Figura 11.2*), rappresenta veramente una fonte energetica alternativa al petrolio con il solo inconveniente che, essendo un gas, ha bisogno di una rete di metanodotti molto diffusa per poter venire utilizzato anche in luoghi piuttosto distanti dai giacimenti da cui viene estratto.

Tabella 11.2

**Riserve mondiali accertate di combustibili fossili ed energia corrispondente a fine 2019**

Combustibili	Riserve*	Energia delle riserve		Esaurimento <sup>#</sup>
		[EJ]	[Mtoe]	[anni]
Petrolio	$244,6 \times 10^9 \text{ Mg}$	$10,241 \times 10^3$	$244,6 \times 10^3$	49,9
Gas naturale	$198,8 \times 10^{12} \text{ m}^3$	$7,158 \times 10^3$	$170,97 \times 10^3$	49,8
Carbone	$1.069.636 \times 10^6 \text{ Mg}$	$22,120 \times 10^3$	$528,33 \times 10^3$	132

\*) Sono le quantità che le informazioni geologiche indicano che possono essere estratte in futuro dalle riserve accertate.

#) L'esaurimento è il rapporto tra la riserva accertata alla fine di un dato anno e la sua produzione in quell'anno, nell'ipotesi che la produzione continui con la stessa intensità.

Questo inconveniente viene superato con il trasporto di gas naturale liquefatto, che una volta raggiunta la destinazione, ritorna allo stato gassoso nel rigassificatore. Complessivamente, i giacimenti accertati di gas ammontavano alla fine del 2019 a  $198,8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , corrispondenti a 49,8 anni di disponibilità ai tassi produttivi attuali (*Tabella 11.2*). Oltre la metà dei giacimenti di gas naturale si trova in soli tre Paesi: Russia, Iran e Qatar.

Vi sono poi le riserve non convenzionali di petrolio e di gas. Le riserve di sabbie bituminose (*tar sands*) e di scisti bituminosi (*oil shales*) del Canada e di greggio ultraspesante (*extra heavy oil*) del Venezuela, che danno un petrolio molto pesante più simile al bitume, sono equivalenti alla somma delle riserve attualmente accertate di petrolio e di gas naturale. Ancor più ricche sono le riserve di gas non convenzionale, come il gas catturabile da giacimenti di scisti e di carbone (*shale gas e coalbed methane*) e gli idrati di gas (*methane hydrates*)<sup>11.4</sup>, riserve che vengono stimate pari ad almeno sette volte quelle accertate di gas naturale. A partire dal 2007, nuove tecnologie – perforazione orizzontale con lunghesse laterali fino a 1500 m dentro lo scisto, per massimizzare l'area superficiale del

11.4 - Nel significato più generale gli idrati sono composti che contengono molecole d'acqua. Gli idrati di gas naturale sono strutture supermolecolari in cui le molecole d'acqua (ospitanti) ingabbiano delle molecole di gas naturale (ospiti). Questa struttura è in fase solida: le molecole d'acqua formano un reticolo cristallino al cui interno si generano delle cavità in cui vanno a posizionarsi le molecole di gas. Al contrario di quanto avviene per il ghiaccio, che rappresenta la forma più comune dell'acqua solida, gli idrati sono stabili anche a temperature sensibilmente maggiori di 0 °C.



foro di trivellazione, e fratturazione idraulica, per creare delle estese fratture artificiali attorno al foro di trivellazione – hanno incrementato, negli Stati Uniti e in Canada, la produttività del gas non convenzionale e ne hanno ridotto drasticamente i costi di produzione. Ciò ha determinato il rapido sviluppo delle risorse di gas non convenzionale sia in Nord-America sia in altre parti della Terra come nello Stato del Queensland in Australia dove il metano estratto viene raffreddato fino a  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  per renderlo liquido, riducendone il volume di 600 volte, e poterlo poi trasportare su navi metaniere in partenza per i porti dotati di rigassificatori.

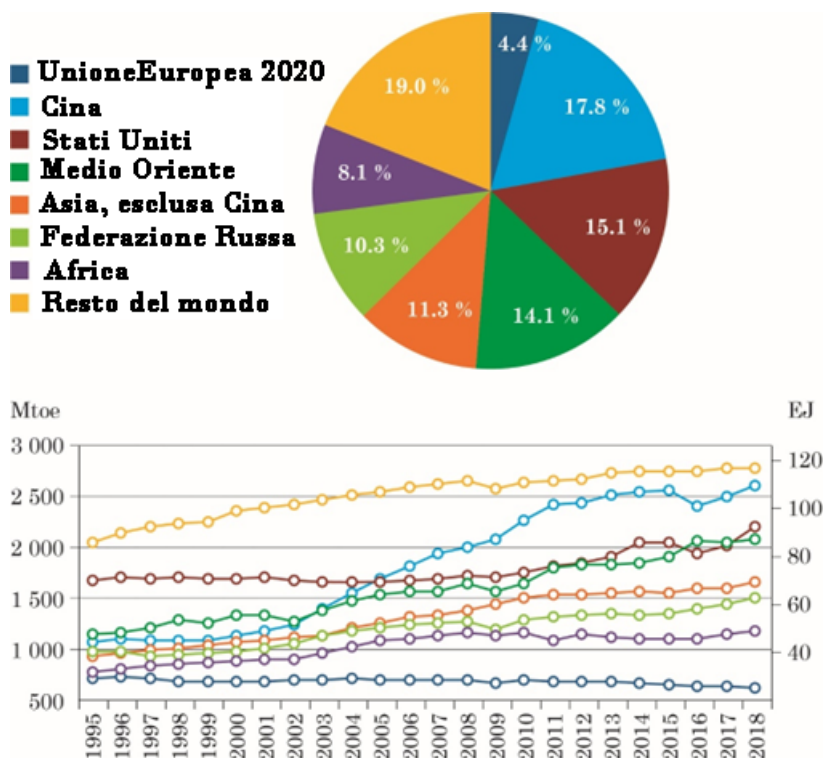


Fig. 11.2 - Produzione mondiale di energia dal 1995; energia totale prodotta nel 2018: 14.421 Mtoe = 603,78 EJ (Unione Europea, 2020).

Un'altra tecnologia si basa sulla gassificazione sotterranea del carbone (*underground coal gassification*) con l'apertura di due pozzi: nel primo si inietta un ossidante capace di provocare una combustione da cui si genera il gas di sintesi (*syngas*), costituito da una miscela di monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H<sub>2</sub>), che viene quindi pompato all'esterno attraverso il secondo pozzo; il gas di sintesi viene poi trasformato in modo da poter essere utilizzato come combustibile gassoso o liquido (soprattutto gasolio) con il processo Fischer-Tropsch<sup>11.5</sup>.

Il **carbone** (*coal*) rappresenta la fonte energetica maggiormente disponibile con risorse accertate di 132 anni. Il carbone, al pari dell'olio combustibile che rappresenta la frazione più pesante che si ricava dalla distillazione del petrolio, contiene quasi sempre zolfo e dà

**11.5** - Il processo Fischer-Tropsch è un processo chimico utilizzato per produrre combustibili sintetici (metanolo e idrocarburi) a partire da miscele gassose di monossido di carbonio e idrogeno (*synthesis gas*, di solito abbreviato in *syngas*) in presenza di catalizzatore.

luogo a inquinanti che possono essere efficacemente controllati solo in impianti termoelettrici di grosse dimensioni, dove è possibile installare depuratori adeguati.

### // 11.3 Energia nucleare

La quarta sorgente di energia non rinnovabile è costituita dal combustibile **nucleare** (*nuclear*), rappresentato dall'ossido di uranio ( $U_3O_8$ ). L'energia è quella che risulta dalla fissione di 1 g di uranio U-235 con il rilascio di un'energia termica pari a 86.500 MJ. Il consumo di energia nucleare in un anno a livello mondiale è pari a circa il 5% del consumo di energia primaria ed è prevalentemente concentrato in Asia e anche in Europa (Francia).

Inizialmente era stato ipotizzato uno sviluppo molto più intenso del programma nucleare. Negli Stati Uniti, ad esempio, era stata prevista la realizzazione entro il 2000 di 1000 unità nucleari, ma successivamente le previsioni erano state portate a 170 unità e poi questo programma era stato congelato; in Germania è stato addirittura deciso di chiudere tutte le centrali nucleari al più tardi nel 2022, ma la gran parte dei reattori ha cessato di operare già entro la fine del 2011. Problemi di sicurezza del reattore (si ricordano gli incidenti in USA, Inghilterra, Ucraina con Chernobyl nel 1986 e in Giappone nel 1999 e nel 2011), la mancanza di un programma generale per la collocazione dei rifiuti radioattivi e infine il timore della popolazione hanno influito pesantemente nel ridimensionamento del programma nucleare.

### // 11.4 Energia dall'acqua

Da tempo si sfrutta il salto dell'acqua tra due punti situati a quote diverse sulla superficie della terra per produrre, mediante le pale di una turbina idraulica, energia meccanica che aziona un alternatore in modo da generare energia elettrica. La **centrale idroelettrica** viene quindi costruita in luoghi dove è possibile realizzare un dislivello tra bacino e centrale e dove si dispone di una notevole massa d'acqua in grado di alimentare la turbina idraulica con una portata costante. Negli impianti idroelettrici *a serbatoio*, provvisti cioè di bacini artificiali in grado di raccogliere elevate quantità d'acqua, la generazione di energia si basa di più sul salto esistente tra bacino e centrale e meno sulla portata di acqua. Negli impianti idroelettrici *ad acqua fluente*, ottenuti ad esempio collegando due punti di un fiume mediante un percorso più corto di quello normale in modo da ottenere un dislivello adeguato, la generazione di energia si basa di più sulla portata d'acqua e meno sul valore del dislivello. Il consumo a livello mondiale di energia idroelettrica nel 2019 è stato pari al 6,4% dell'energia primaria ed è prevalentemente concentrato in Sud America; ma anche altri Paesi, come la Cina, hanno iniziato a sviluppare impianti idroelettrici (*Figura 11.3*).

Molto più recente è lo sviluppo di sistemi, ancora a livello di prototipi, in grado di produrre elettricità sfruttando l'energia delle onde e delle maree. Anche se al momento esistono prevalentemente impianti sperimentali per la produzione di energia dalle onde e dalle maree, si ritiene che nel prossimo futuro verranno sviluppate tecnologie economicamente convenienti per la generazione di energia nei Paesi costieri.



Fig. 11.3 - L'impianto idroelettrico sul fiume Yangtze in Cina con 26 unità installate, delle quali 6 turbine Francis e 6 generatori elettrici che sono stati forniti dal consorzio Voith Siemens Hydro-Power Generation e General Electric Hydro. La potenza complessiva delle 26 unità, pari a 18.200 MW, equivale a quella prodotta da 15 centrali nucleari oppure 22 centrali a carbone.

## Energia del moto ondoso

L'azione del vento<sup>11.6</sup> sulla superficie marina determina la formazione delle onde; l'energia dell'onda (*wave energy*) viene trasmessa nella direzione di propagazione dell'onda. Le applicazioni più interessanti riguardano i siti affacciati sull'oceano, caratterizzati da onde con potenze medie per metro di fronte d'onda di circa 80 kW/m, mentre nel Mediterraneo, che è un mare chiuso, la potenza è di circa 22 kW/m.

Le onde, generate in acque profonde, si propagano per molti chilometri con perdite minime di energia; allorché arrivano in prossimità della costa, l'energia viene dissipata per attrito sul fondale determinando la brusca diminuzione della potenza dell'onda che scende al di sotto di 15 kW/m. Dei diversi dispositivi studiati, si possono citare, come esempi, quelli a tracimazione e quelli a colonna d'acqua oscillante (*Figure 11.4 e 11.5*).

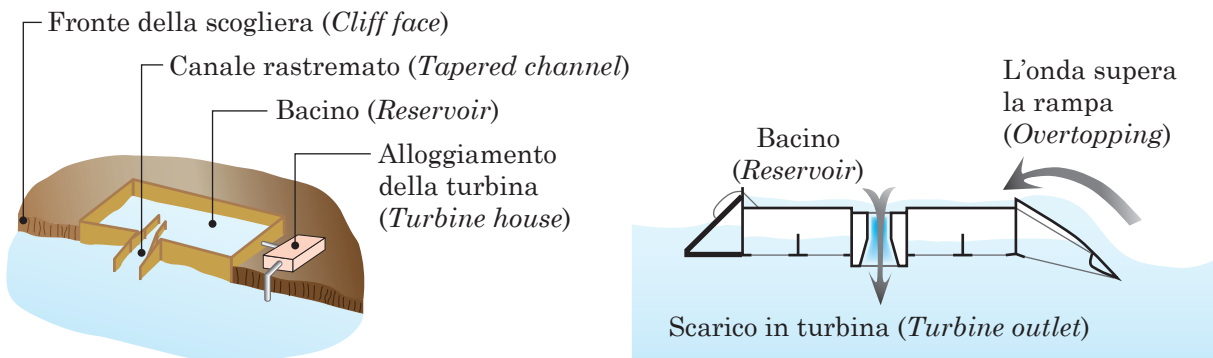


Fig. 11.4 - Dispositivi a tracimazione: nello schema di sinistra, l'azione dell'onda spinge l'acqua su un canale rastremato (*Tapered channel*) oppure (a destra) su una rampa (*Wave dragon*, letteralmente "dragone dell'onda") rovesciandosi in un bacino di accumulazione e uscendo attraverso una turbina Kaplan.

11.6 - Le onde rappresentano una riserva di energia solare, poiché il vento che genera le onde è provocato dalle differenze di pressione presenti nell'atmosfera dovute alla radiazione solare.

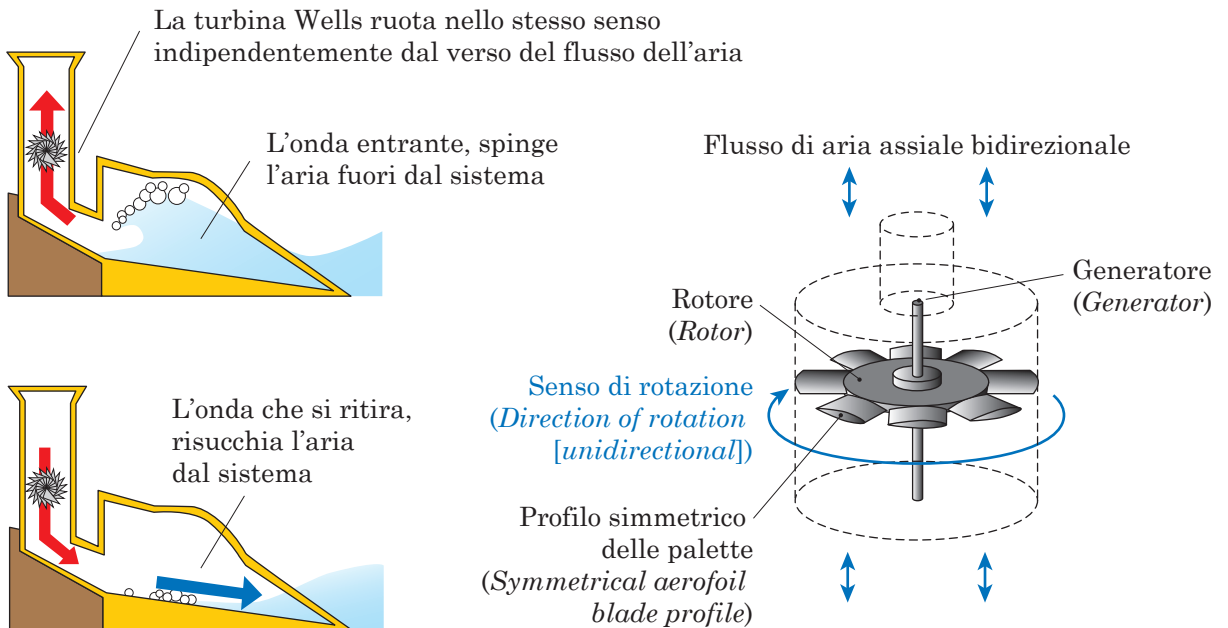


Fig. 11.5 - Dispositivo a colonna d'acqua oscillante (*Oscillating water column*). È un processo in due tempi: l'onda che entra spinge l'aria oltre la turbina e fa aumentare la pressione entro la colonna; quando l'onda si ritira, l'aria è risucchiata indietro a causa della ridotta pressione dell'aria sul lato della turbina verso l'oceano. Indipendentemente dal verso del flusso d'aria, la turbina ad aria Wells, dal nome del suo inventore, mantiene sempre lo stesso senso di rotazione e fornisce energia tramite un generatore elettrico. Un sistema chiamato LIMPET, utilizzato nell'isola di Islay in Scozia, è stato ottimizzato per onde aventi un'intensità media annuale da 15 a 25 kW/m; la colonna d'acqua alimenta un paio di turbine controrotanti, ciascuna delle quali aziona un generatore elettrico da 250 kW.

## Energia mareomotrice

Il flusso e il riflusso della marea<sup>11.7</sup> muta l'altezza dell'acqua in prossimità della costa offrendo così la possibilità di generare *energia dalle maree (tidal energy)* sfruttando le differenze di altezza dell'acqua soprattutto quando la conformazione della costa è tale da generare forti correnti di marea (*Figure 11.6 e 11.7*).

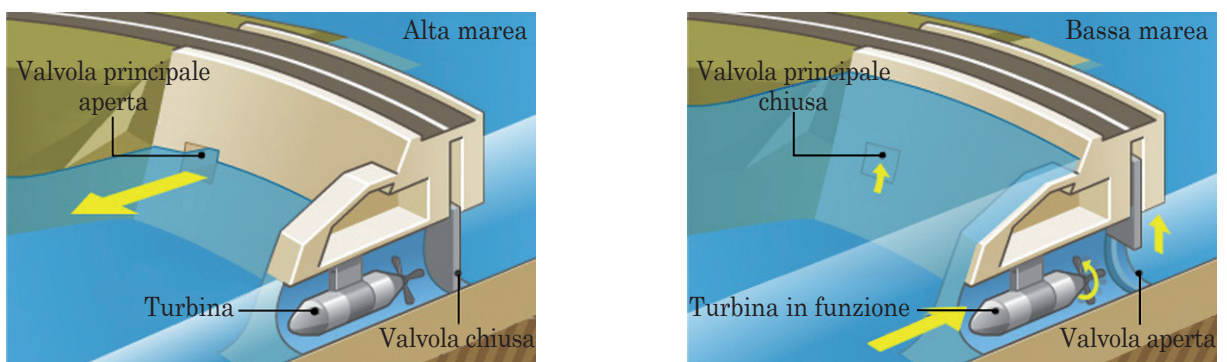


Fig. 11.6 - Schema di impianto per utilizzare l'energia delle maree: nel momento della bassa marea, l'acqua, che si è accumulata nel bacino durante l'alta marea, viene scaricata attraverso il gruppo turbina - alternatore generando energia elettrica.

**11.7** - L'attrazione gravitazionale della Luna sulle masse d'acqua dei mari e degli oceani combinata dalla rotazione della Terra intorno al Sole è la causa delle maree.



Un impianto per generare energia dalle maree può essere realizzato in molti luoghi lungo la costa, ma l'energia viene più facilmente imbrigliata dove vi è un estuario. I siti migliori, per installare degli impianti di generazione di energia dalle maree, sono quelli che hanno una forte variazione dell'altezza dell'acqua dovuta alla marea e un estuario stretto. Le barriere per sfruttare l'energia della marea possono offrire protezione contro le inondazioni della costa durante maree molto alte agendo come barriere alle tempeste del moto ondoso; la presenza poi di una strada sopra la diga di sbarramento rappresenta uno dei maggiori benefici (Figura 11.8).

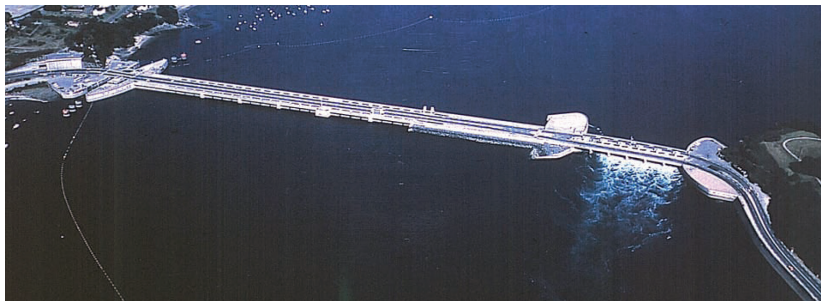


Fig. 11.7 - L'impianto a sbarramento di marea di La Rance, vicino a St. Malo in Francia, è dotato di 24 turbine a bulbo, ciascuna di 5,4 m di diametro e 10 MW di potenza.

Fig. 11.8 - Impianto di Sihwa nella Corea del Sud, con 10 turbine aventi ciascuna un diametro di 7,5 m e una potenza di 26 MW; è l'impianto più grande al mondo per lo sfruttamento dell'energia delle maree.



## 11.5 Energia solare

L'**energia solare** (*solar energy*) è l'energia, termica oppure elettrica, che si ottiene sfruttando direttamente l'energia irradiata dal Sole. Il processo di fusione nucleare infatti, che avviene all'interno del Sole, consente di produrre un'enorme quantità di energia che si propaga alla velocità della luce di 300.000 km/s sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. L'energia solare teoricamente disponibile sulla Terra è pari a  $2.500.000 \times 10^{18}$  EJ (exajoule), ma solo una piccolissima parte di questa è utilizzabile ( $600 \times 10^{18}$  EJ); limiti all'impiego dell'energia solare sono quelli tipici delle fonti rinnovabili:

- non essendo concentrata, occorre raccogliere l'energia solare utilizzando aree molto vaste;
- bassi rendimenti e impianti di costo elevato.

L'energia della radiazione solare che incide in un giorno su un m<sup>2</sup> di superficie terrestre è fortemente variabile in funzione della latitudine (*Figura 11.9*), della stagione (nelle zone temperate oscilla da 5 MJ/m<sup>2</sup>/giorno in gennaio a 22 MJ/m<sup>2</sup>/giorno in giugno) e dello stato del cielo. Alle latitudini europee l'energia solare media vale circa 200 W/m<sup>2</sup>, corrispondente a un'energia annua di 200 W/m<sup>2</sup> × 365 giorni/anno × 24 ore/giorno = 1752,0 kWh/m<sup>2</sup> = 6307,2 MJ/m<sup>2</sup>. Il valore di 200 W/m<sup>2</sup> viene considerato il limite inferiore per lo sfruttamento dell'energia solare; valori ottimali si situano attorno a 320 W/m<sup>2</sup>, corrispondenti a un'energia annua pari a 320 W/m<sup>2</sup> × 365 giorni/anno × 24 ore/giorno = 2803,2 kWh/m<sup>2</sup> = 10.091,5 MJ/m<sup>2</sup>.

#### Idoneità alla realizzazione di impianti solari a concentrazione

Eccellente
  Buono
  Idoneo
  Non idoneo

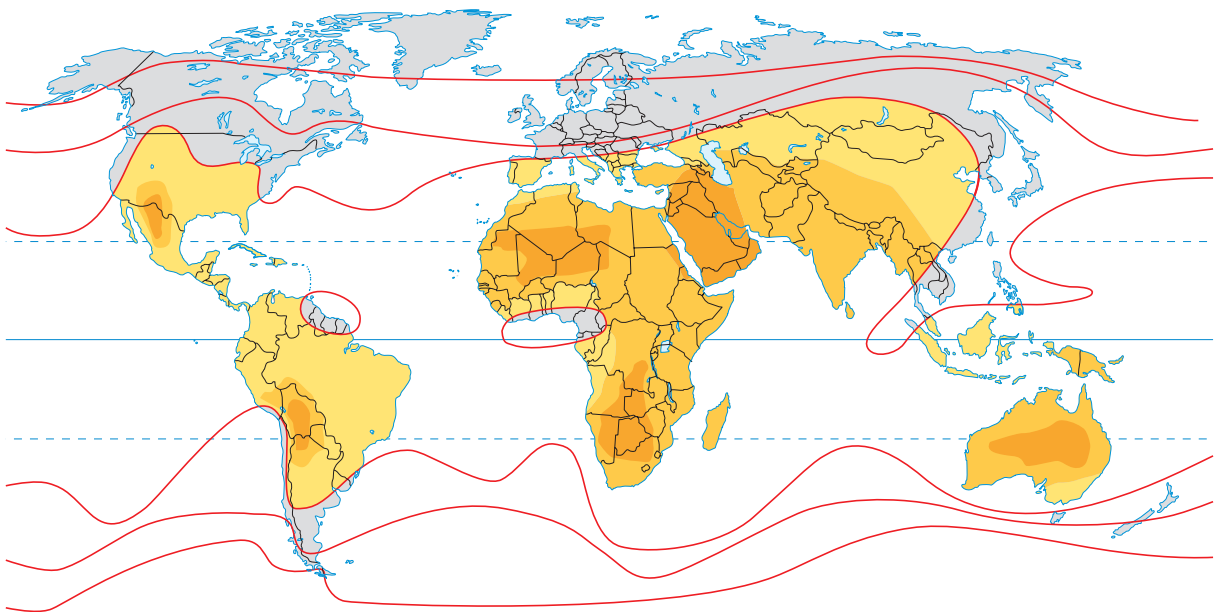


Fig. 11.9 - Mappa dell'irraggiamento solare diretto. Non viene cioè considerata la componente diffusa, dovuta alla dispersione della radiazione diretta causata dall'atmosfera e anche dall'emissione di raggi infrarossi generati dal riscaldamento dell'atmosfera.

L'energia solare può essere utilizzata per generare calore oppure elettricità mediante un *pannello*:

- *solare termico* che sfrutta i raggi solari per scaldare un liquido di caratteristiche speciali che cede calore, tramite uno scambiatore, all'acqua contenuta in un serbatoio di accumulo;
- *solare a concentrazione* che raccoglie mediante specchi i raggi del Sole per concentrarli in un ricevitore dove l'alta temperatura viene ceduta a un fluido oppure a un sale;
- *fotovoltaico* basato sulla capacità di alcuni materiali semiconduttori, come il silicio cristallino, di generare, quando esposti alla radiazione solare, delle cariche elettriche raccolte mediante contatti metallici sotto forma di corrente continua.



## Pannello solare termico

I collettori del *pannello solare termico* (Figura 11.10) possono essere a:

- circolazione naturale del liquido che, diventato più leggero a causa dell'aumento di temperatura, si sposta verso l'alto nel serbatoio di accumulo richiamando verso il basso la massa di liquido più pesante che ha ceduto calore nello scambiatore. È per questo che, in presenza di circolazione naturale, il serbatoio di accumulo, che contiene lo scambiatore di calore, si trova nella parte superiore del pannello;
- circolazione forzata per la presenza di una pompa che fa circolare il fluido allorché la sua temperatura nel collettore è maggiore di quella all'interno del serbatoio di accumulo. Si tratta di un sistema più complesso e per numero di componenti (pompe, sensori, valvole ecc.) e per controllo, ma che ha il vantaggio di poter posizionare il serbatoio di accumulo dovunque, anche a terra quando, a causa del peso, non vi sia la possibilità di collocare il serbatoio sul tetto.



Fig. 11.10-a - Pannello solare termico.

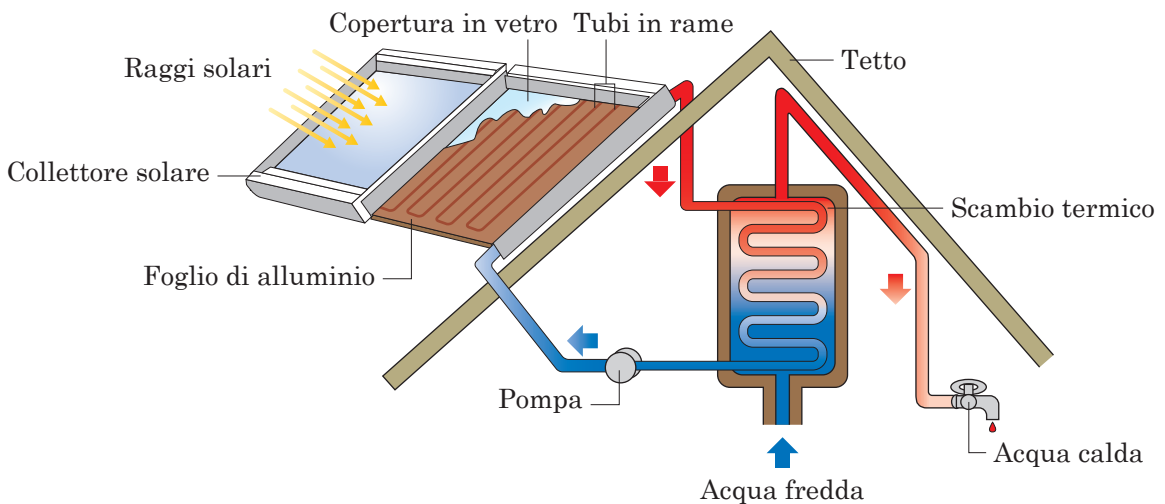


Fig. 11.10-b - Schema di pannello solare a circolazione forzata. Di solito è di alluminio o rame, verniciato in nero, per assorbire le radiazioni solari. Sopra al pannello c'è un vetro di isolamento che impedisce alle radiazioni riflesse di disperdersi all'esterno (effetto serra), mentre nella parte posteriore vi è uno strato isolante per minimizzare la dispersione di calore. La pompa fa circolare l'acqua che, diventata calda, scambia calore nella serpentina con l'acqua del serbatoio.

## Pannello solare a concentrazione

Nel *pannello solare a concentrazione* l'energia solare viene utilizzata come fonte di energia termica ad alta temperatura mediante la focalizzazione della radiazione solare in appositi

ricevitori. Per questo si sfrutta la sola componente diretta della radiazione mentre viene persa la componente diffusa (*Figura 11.9*).

Si possono individuare quattro fasi nel processo di produzione di energia termica ad alta temperatura (*Figura 11.11*):

1. la radiazione solare viene raccolta e concentrata nel concentratore, costituito da pannelli aventi una superficie riflettente (lo specchio), che viene movimentata durante la giornata per inseguire il percorso del Sole;
2. il concentratore invia la radiazione sul ricevitore dove viene trasformata in energia termica ad alta temperatura ( $400 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) che viene ceduta a un fluido (*termovettore*) costituito da oli minerali oppure, per le temperature più alte, da sali fusi;
3. l'energia termica viene trasportata ed eventualmente accumulata sfruttando il calore sensibile del fluido termovettore posto in serbatoi coibentati oppure cedendo il calore di questo fluido a materiali inerti dotati di elevata capacità termica<sup>11.8</sup>;
4. l'energia termica prodotta viene impiegata per la generazione di energia elettrica (*Figura 11.11*) oppure in processi industriali, come la dissalazione dell'acqua di mare, oppure per usi domestici.

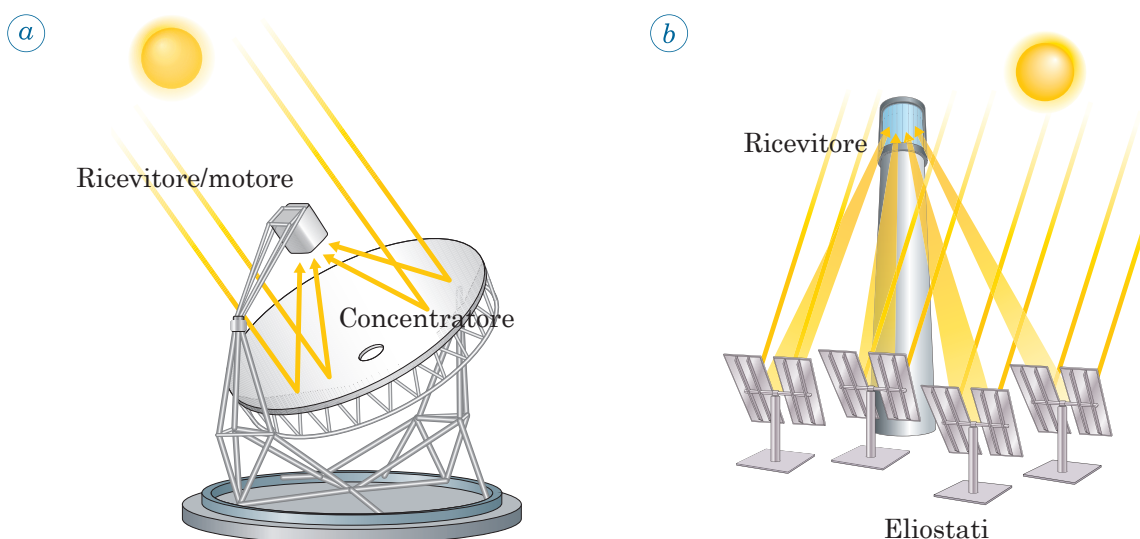


Fig. 11.11 - Collettori per sistemi a concentrazione e impianto per la generazione di elettricità (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani).

a) A disco parabolico: un pannello riflettente di forma parabolica insegue il Sole, con un movimento di rotazione attorno a due assi ortogonali, e concentra la radiazione solare su un ricevitore montato nel fuoco della parabola.

b) A torre centrale: i pannelli riflettenti piani (eliostati) inseguono il Sole con un movimento di rotazione su due assi, concentrando la radiazione solare su un unico ricevitore montato in cima a una torre.

**11.8** - L'accumulo dell'energia termica asportata dal fluido termovettore è un elemento fondamentale degli impianti a concentrazione. Esso viene quantificato dal *moltiplicatore solare* definito come rapporto tra la potenza termica di picco del ricevitore e la potenza termica utilizzata nel processo produttivo. In assenza di un processo di accumulo questo parametro vale 1, mentre valori superiori indicano la capacità dell'impianto di accumulare l'energia termica in eccesso in modo da poterla utilizzare anche in altri momenti della giornata quando non è più possibile captare la radiazione solare.

## Pannello fotovoltaico

La cella solare del *pannello fotovoltaico* è generalmente di forma quadrata e di superficie pari a circa  $100 \text{ cm}^2$ ; si comporta come una minuscola batteria, generando una tensione di circa  $500 \text{ mV}$  (millivolt) con una corrente di  $3 \text{ A}$  (ampere). Più celle formano i moduli: le celle vengono collegate in serie oppure in parallelo in funzione dei valori di tensione o di

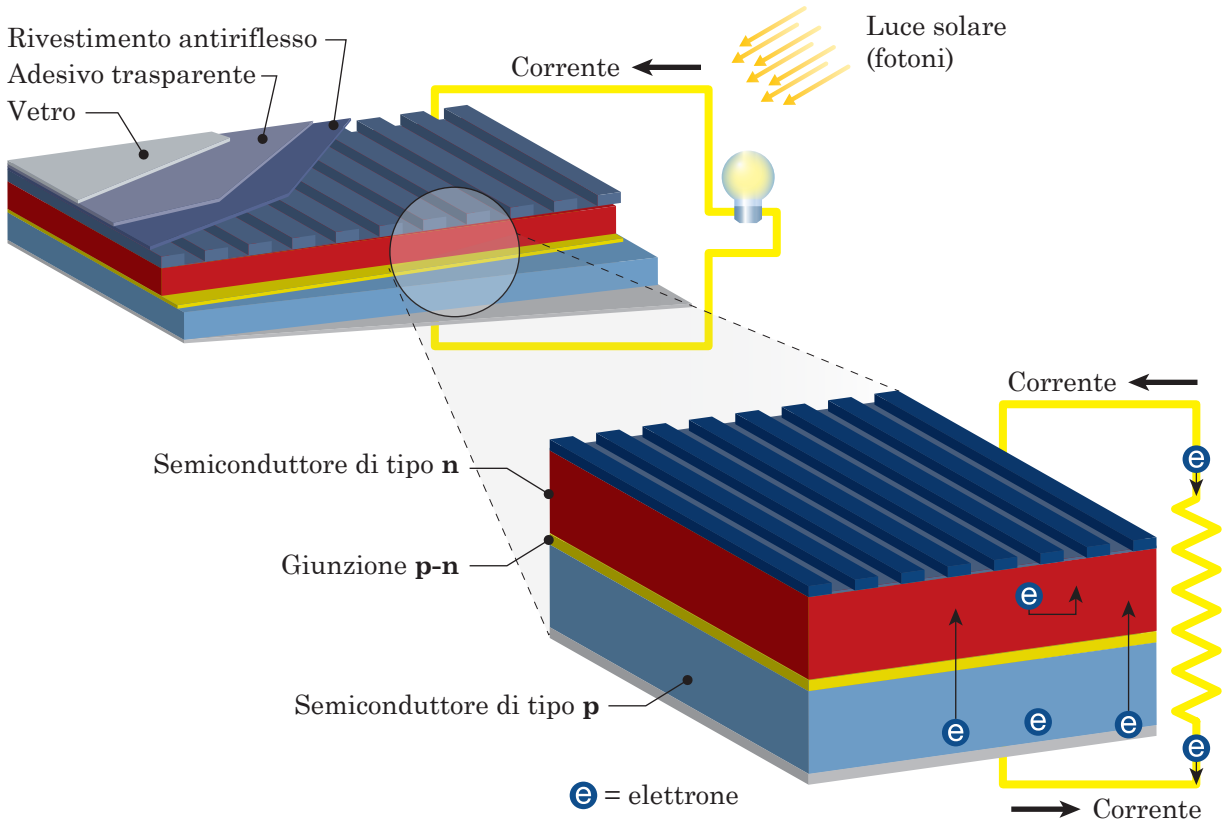


Fig. 11.12-a - Il silicio, elemento base della cella fotovoltaica<sup>11.9</sup>, allorché trattato (drogato) con altri elementi (a livello delle parti per milione) presenta strutture diverse: positiva di tipo **p** oppure negativa di tipo **n**. La struttura di tipo **p**, ottenuta aggiungendo boro, ha un numero di elettroni insufficiente (eccesso di lacune), mentre la struttura di tipo **n**, ottenuta aggiungendo fosforo, ha un eccesso di elettroni. La cella solare consiste appunto di due strati di semiconduttori, uno di tipo **p** e l'altro di tipo **n**, posti insieme come in un tramezzino a formare una giunzione **p-n**. Nella cella solare gli elettroni e le lacune vicino alla giunzione **p-n** sono spinti in direzioni opposte dall'azione del campo elettrico, mentre altri diffondono verso la giunzione per rimpiazzarli. La separazione delle cariche genera una tensione nel sistema che, quando il sistema viene collegato a un circuito esterno, dà luogo al passaggio della corrente elettrica [<http://www.youtube.com/watch?v=x2zjdtxrisc>].

**11.9** - Nell'effetto fotovoltaico, la radiazione elettromagnetica colpisce un materiale adatto, cede energia agli elettroni più esterni del materiale e, se questa è sufficiente, l'elettrone risulta libero di allontanarsi dall'atomo di origine: l'elettrone passa dalla banda di valenza (lo stato legato più esterno) alla banda di conduzione (dove non è più legato). L'assenza dell'elettrone viene chiamata lacuna. L'energia minima necessaria all'elettrone per allontanarsi dall'atomo deve essere superiore alla banda proibita (*band gap*) del materiale. Il materiale che si presta a questa operazione è un semiconduttore, in particolare il silicio opportunamente trattato, che per le sue proprietà elettriche viene impiegato anche nei microprocessori dei calcolatori. Le particelle di luce (fotoni), che investono il semiconduttore, determinano la transizione in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un ugual numero di lacune che passa in banda di valenza. Sono così disponibili dei portatori di carica che vengono utilizzati per generare una corrente.

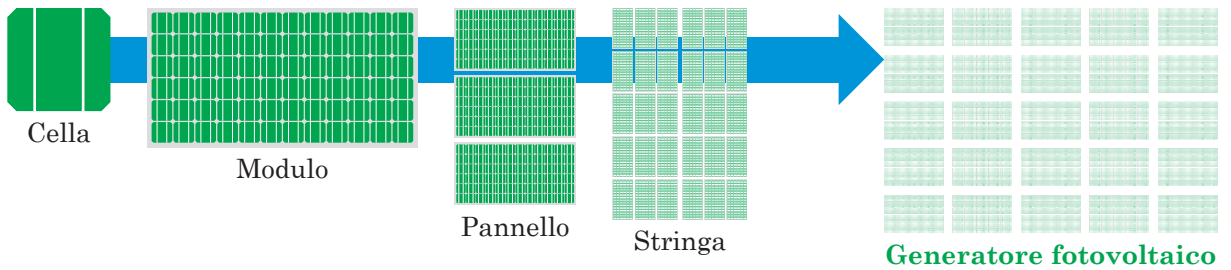


Fig. 11.12-b - Dalla cella al generatore fotovoltaico.

corrente richiesti dall'utenza. Nei moduli vengono, in genere, connesse in serie o in parallelo 36 celle; queste vengono incapsulate in un isolante dielettrico, con funzione anche di sigillante, tra una lastra di vetro (dotata di ottima trasmittanza, antiriflesso e buona resistenza meccanica) e la cella. I moduli vengono assemblati in pannelli e quindi in stringhe che costituiscono il generatore fotovoltaico (*Figura 11.12*).

L'efficienza finale di conversione del pannello fotovoltaico installato nell'impianto si aggira attorno al 18%; alcuni produttori, come la cinese Suntech, riescono ad arrivare a un'efficienza di conversione del 23% e, in laboratorio, i ricercatori (*Fraunhofer Institute for Solar Energy*) sono arrivati al 41,2%. Un aspetto positivo è la lunga durata (fino a 30 anni) accompagnata da una manutenzione estremamente ridotta per l'assenza di parti mobili; per contro, il costo risulta ancora alto, anche se negli ultimi anni si è ridotto di più del 20%, ed esiste il problema di immagazzinare l'energia elettrica, difficilmente accumulabile in grandi quantità. Per questo, molti Paesi, in primo luogo la Germania e poi l'Italia, hanno introdotto una legislazione che, oltre a incentivare l'installazione di pannelli fotovoltaici, consente di vendere l'energia elettrica in eccesso a chi gestisce la rete.

Il maggior utilizzo attuale dell'energia solare è rivolto alla produzione di acqua calda e al riscaldamento di abitazioni mediante il pannello solare termico. La modesta efficienza accompagnata dagli alti costi di gestione e la discontinuità della fornitura elettrica ha ridimensionato le aspettative nell'uso delle centrali solari basate su pannelli a concentrazione. L'impiego dei pannelli fotovoltaici, fino a poco tempo fa confinato ad alimentare utilizzatori distanti dalla rete elettrica, ad esempio impianti domestici degli aborigeni del deserto australiano (*Figura 11.13*), oppure dispositivi aventi un consumo talmente basso da risultare antieconomico il loro allacciamento alla rete (segnaletica stradale luminosa), si va ora estendendo all'edilizia residenziale e pubblica con una crescita estremamente rapida (*Figura 11.14*), soprattutto in Germania e in Italia.



Fig. 11.13 - Nel deserto australiano, diverse comunità di aborigeni usano, per la generazione di energia elettrica, i pannelli fotovoltaici anziché i motori Diesel.



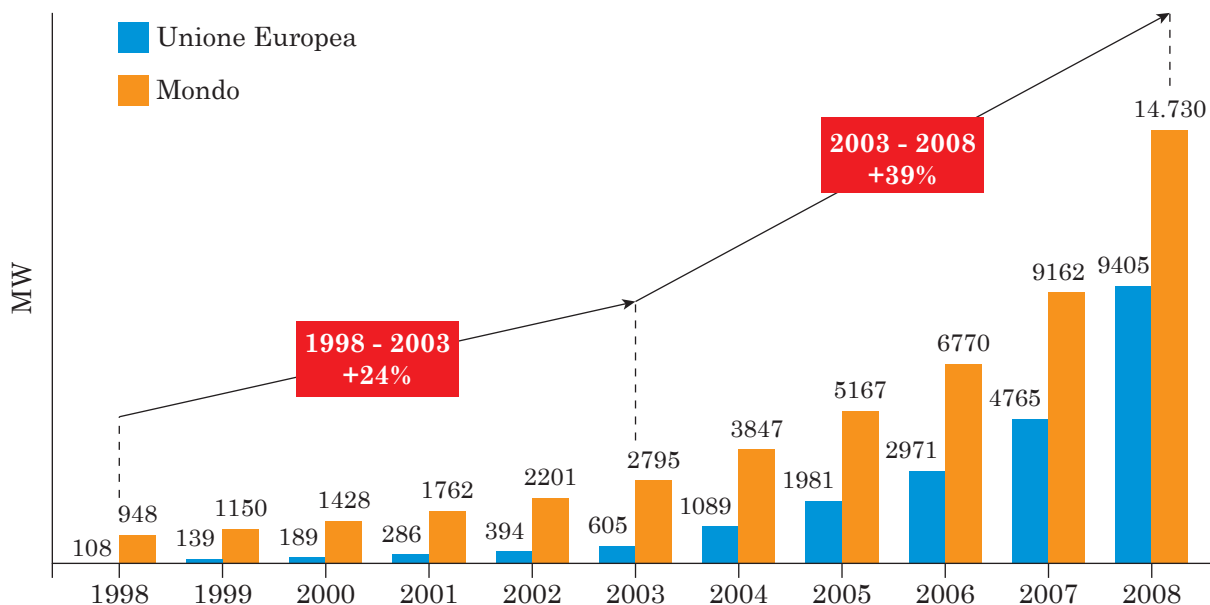


Fig. 11.14 - Capacità installata cumulata [MW] di fotovoltaico nell'Unione Europea e nel mondo (EPIA, *European Photovoltaic Industry Association*). Le applicazioni fotovoltaiche hanno subito una notevole accelerazione a partire dal 2003 con una capacità installata a fine 2010 di 21.600 MW.

## 11.6 Energia eolica

La differenza di pressione tra due punti dell'atmosfera, originata dal riscaldamento della superficie terrestre sotto l'azione dell'energia solare, dà luogo al *vento*, moto ordinato e quasi orizzontale delle masse d'aria. Il profilo e le irregolarità della superficie influenzano profondamente il vento e le sue caratteristiche locali: il vento soffia con maggiore velocità su superfici piatte come il mare e si rinforza sulla sommità delle alture o nelle valli orientate parallelamente alla direzione del vento dominante. Così, per poter sfruttare l'energia del vento, è importante tener conto delle variazioni di velocità che si possono verificare tra luoghi distanti tra loro anche di pochi chilometri.

Il vento rappresenta una delle forme più antiche di energia utilizzata per l'azionamento diretto di macchine operatrici, ad esempio una pompa; impiego tipico era



Fig. 11.15 - Quattro generatori eolici a Thornton, 28 km al largo della costa belga sul Mare del Nord; lunghezza della pala = 61,5 m, diametro del rotore = 126 m, potenza = 5 MW (REpower).

il mulino a vento (*Figura 10.9-a*), abbandonato nel secolo scorso. Attualmente presenta maggiore interesse la trasformazione dell'**energia eolica** (*wind energy*) in energia elettrica (*Figura 10.8-b*) attraverso una macchina, l'**aerogeneratore** (*wind turbine*), composto dalla turbina eolica – un rotore che per mezzo di un certo numero di pale fissate su un mozzo sottrae al vento parte della sua energia cinetica – accoppiata, mediante un moltiplicatore di giri, al generatore elettrico.

La configurazione tipica di un aerogeneratore ad asse orizzontale è rappresentata da un sostegno che porta, alla sua sommità, la gondola, in cui sono contenuti l'albero di trasmissione lento, il moltiplicatore di giri, l'albero veloce, il generatore elettrico e i dispositivi ausiliari. All'estremità dell'albero lento (esternamente alla gondola) è fissata l'*elica* (abituamente viene indicata con il nome di *rotore*), costituita da un mozzo sul quale sono montate le pale, a profilo alare. La gondola è in grado di ruotare, rispetto al sostegno, in modo da mantenere l'asse della macchina sempre parallelo alla direzione del vento.

Un aerogeneratore lavora con una velocità del vento compresa tra i 5 e i 13 ÷ 14 m/s. Gli impianti possono essere realizzati sulla terraferma (*Figura 10.8-b*) oppure in mare, dove è possibile utilizzare una sorgente di energia del 30-40% più grande di quanto non sia sulla terraferma a causa di un vento più intenso e più stabile (*Figura 11.15*). Sulla base della posizione del rotore rispetto alla direzione del vento, si possono distinguere in aerogeneratori ad asse orizzontale (*Figura 11.16*) oppure ad asse verticale (*Figura 11.17*).



Fig. 11.16 - Un generatore eolico può arrivare anche a potenze molto elevate: un aerogeneratore ad asse orizzontale nella base area militare di Warren (Wyoming) in grado di erogare fino a 2 MW di potenza elettrica.



Fig. 11.17 - Aerogeneratore ad asse verticale (ROPATEC) usato in zone climaticamente severe, come quelle montuose o artiche. Sono infatti aerogeneratori più semplici per l'assenza del sistema che regola l'inclinazione della gondola rispetto alla direzione del vento.



## 11.7 Energia geotermica

Con **energia geotermica** (*geothermal energy*) si intende generalmente la possibilità di estrarre calore dalle regioni ad alta temperatura che si trovano in prossimità della superficie della Terra (dal greco *geotermia*). Il nucleo della Terra, a 6370 km di profondità, ha una temperatura di circa 5000 °C; il calore fluisce verso la superficie e viene condotto dalle rocce del mantello, lo strato che circonda il nucleo (*Figura 11.18-a*). Quando temperatura e pressione aumentano oltre un certo limite, la roccia del mantello fonde e diventa magma che, essendo meno denso della roccia circostante solida, sale lentamente verso la crosta, trasportando calore, che a volte arriva in superficie attraverso una fenditura sotto forma di lava; molto più spesso rimane sotto la crosta, scaldando le rocce e l'acqua dovuta alla pioggia infiltratasi in profondità attraverso gli strati rocciosi, con temperature che possono arrivare a 370 °C. Assunta una temperatura superficiale media di 15 °C, l'energia termica totale contenuta nella Terra risulta dell'ordine di  $12,6 \times 10^{24}$  MJ, mentre quella del mantello è dell'ordine di  $5,4 \times 10^{21}$  MJ. L'utilizzazione di questa enorme energia può però avvenire solo in parte e, fino ad ora, è stata limitata a quelle aree nelle quali condizioni geologiche favorevoli hanno permesso al fluido vettore (acqua e/o vapore) di trasportare in superficie l'energia termica delle formazioni profonde ad elevata temperatura (*Figura 11.18-b*).

Un *sistema geotermico* è formato da tre elementi (*Figura 11.19*):

- la sorgente di calore che può essere un'intrusione di magma ad alta temperatura (>600 °C) posizionata a 5 ÷ 10 km di profondità;
- il fluido geotermico (di solito acqua in fase liquida oppure vapore) che trasporta il calore;
- un serbatoio, costituito da rocce calde porose nelle quali il fluido può circolare assorbendo calore e collegato a zone superficiali dalle quali le precipitazioni (acque meteoriche) possono infiltrarsi per reintegrare parzialmente o del tutto il fluido perduto attraverso vie naturali, ad esempio le fumarole, oppure estratto mediante pozzi.

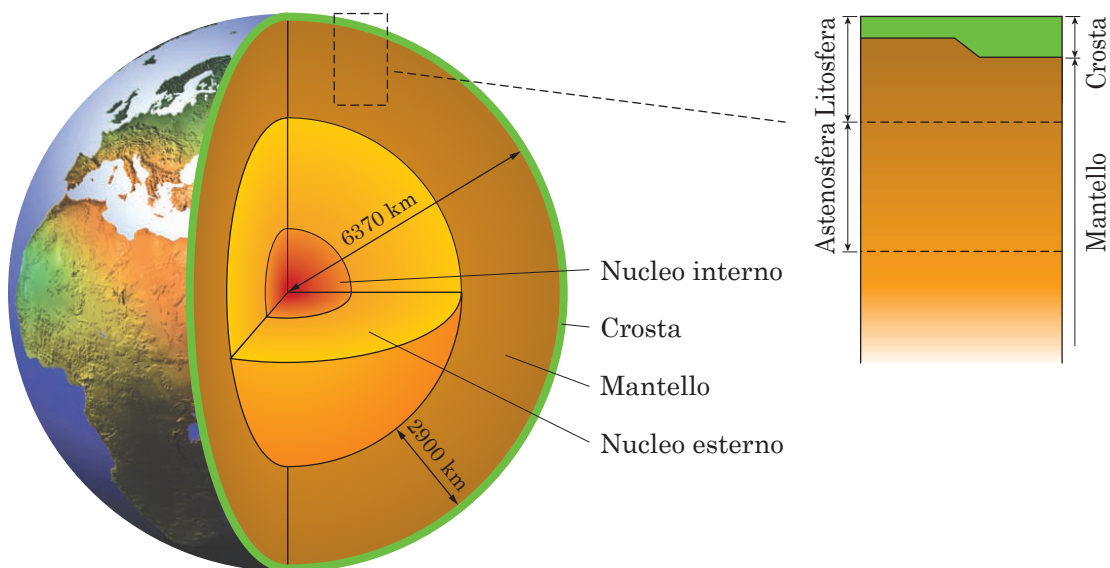


Fig. 11.18-a - Struttura interna della Terra: crosta, mantello e nucleo (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani).



Fig. 11.18-b - La centrale elettrica geotermica di Nesjavellir in Islanda.

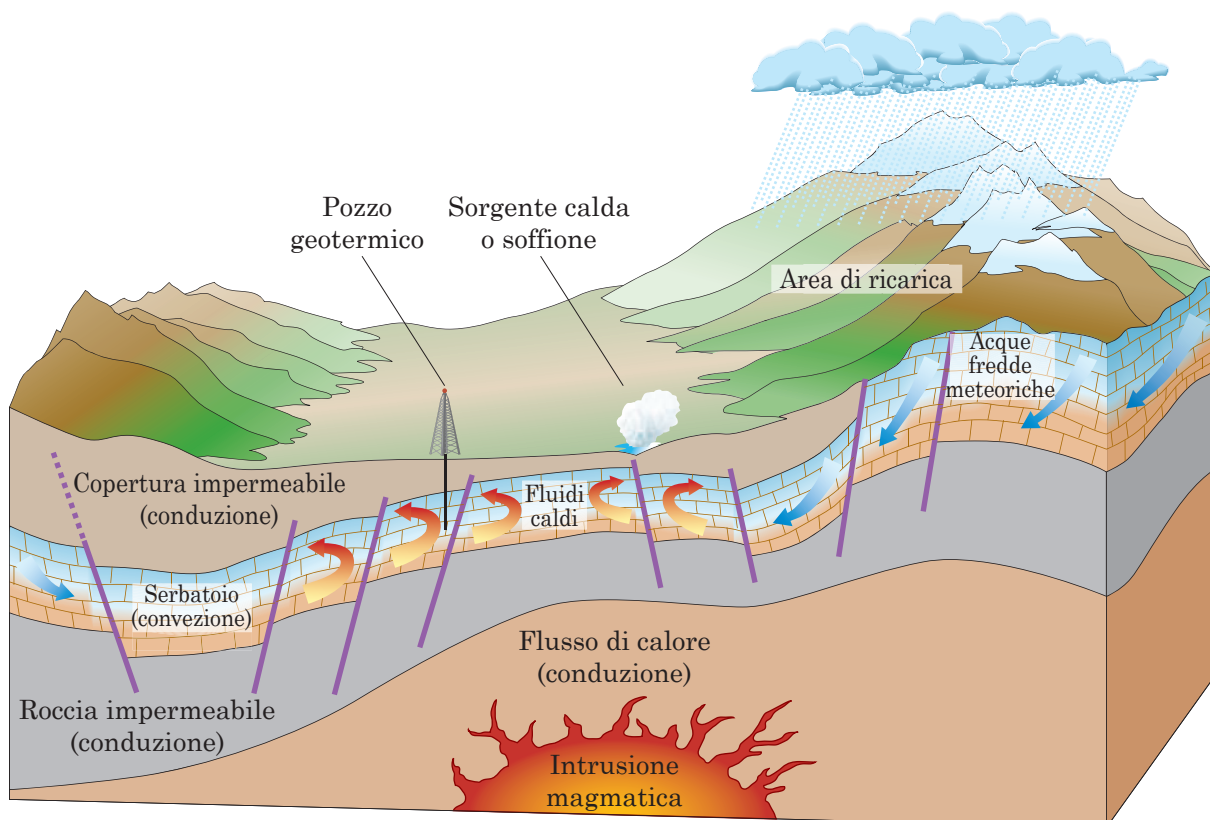


Fig. 11.19 - Schema di un sistema geotermico (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani).

Nel sistema geotermico, il fluido caldo e quindi di minore densità tende a salire e a essere sostituito dal fluido più freddo e quindi di maggiore densità proveniente dalla periferia del sistema: è questo un processo di convezione del calore che fa salire la temperatura delle parti alte del sistema, mentre corrispondentemente diminuisce la temperatura delle parti inferiori. Per l'esistenza del sistema geotermico è essenziale la presenza della sorgente di calore; gli altri due elementi – fluido e serbatoio – possono essere artificiali. Così il fluido scaricato da una centrale geotermoelettrica, dopo che ne è stata utilizzata l'energia termica, viene artificialmente immesso di nuovo (reiniettato) nel serbatoio da cui era stato estratto attraverso appositi pozzi di *reiniezione*<sup>11.10</sup>. Oltre al fluido, può essere artificiale anche il serbatoio come nel caso della stimolazione idraulica della sorgente di calore (processo rocce calde secche<sup>11.11</sup>) che utilizza due pozzi scavati a una distanza sufficiente l'uno dall'altro: attraverso il primo pozzo viene iniettata acqua fredda ad alta pressione che frattura la roccia calda, rendendola porosa, e può così insinuarsi al suo interno (è il serbatoio); l'acqua fredda iniettata estrae il calore, divenendo così il fluido ad alta temperatura che esce attraverso il secondo pozzo e alimenta l'impianto termoelettrico; all'uscita dall'impianto l'acqua ridiviene fredda, viene reiniettata e il ciclo ricomincia.

Le risorse geotermiche vengono suddivise in sistemi ad acqua dominante, i più diffusi, e sistemi a vapore dominante. Nei sistemi geotermici ad *acqua dominante*, l'acqua, anche se a una temperatura compresa tra 125 °C e 225 °C, è allo stato liquido perché si trova sottoposta nel serbatoio a una pressione più alta della pressione atmosferica. Questi sistemi possono produrre, a seconda della loro temperatura e pressione, acqua calda oppure una miscela di acqua e vapore oppure infine vapore. I serbatoi ad acqua dominante con temperatura superiore a 150-170 °C sono impiegati per alimentare centrali a singolo o doppio *flash*. L'acqua arriva in superficie tramite i pozzi e, poiché passa rapidamente dalla pressione di serbatoio a quella dell'atmosfera, si separa (*flash singolo*) in una parte di vapore, che è mandato in centrale, e una parte di liquido che è reiniettato in serbatoio. Se il fluido geotermico arriva in superficie con temperature particolarmente elevate, allora può essere sottoposto per due volte a un processo di flash (*flash doppio*). I sistemi geotermici a *vapore dominante* sono ad alta temperatura; nel serbatoio coesistono acqua liquida e vapore; quest'ultimo determina la pressione del sistema. Si tratta di sistemi piuttosto rari (Larderello in Italia e "The Geysers" in California) che generalmente producono vapore secco o surriscaldato, cioè vapore in cui è assente la fase liquida. Il vapore<sup>11.12</sup> viene raccolto e quindi convogliato da apposite tubazioni coibentate (i vapordotti fotografati in *Figura 11.20*), in modo da non disperderne il calore, fino all'impianto di trattamento.

---

**11.10** - La reiniezione del fluido (praticamente acqua), una volta utilizzato dal punto di vista termico, viene ormai generalmente praticata per ridurre l'impatto ambientale del processo. L'intenso prelievo di acqua dalle falde e la conseguente diminuzione della pressione può infatti determinare, in alcuni casi, il graduale abbassamento della superficie del suolo (*subsidenza*).

**11.11** - Il processo roccia calda e secca (*hot dry rock*), nato negli Stati Uniti agli inizi degli anni Settanta, è stato ulteriormente sviluppato nell'ambito dei sistemi geotermici avanzati (*enhanced geothermal systems*) che non richiedono risorse idrotermiche convettive naturali.

**11.12** - Il vapore spesso trascina con sé altri elementi e/o composti (biossido di carbonio CO<sub>2</sub>, solfuro di idrogeno H<sub>2</sub>S, boro B, ammoniaca NH<sub>3</sub> ecc.). È per questo motivo che Larderello nell'Ottocento venne utilizzato per la produzione di acido borico, borace e bicarbonato di ammonio e, solo a partire dal 1904, si iniziarono a costruire impianti nei quali prima il vapore veniva fatto espandere per trasformare in energia elettrica l'energia termica posseduta e quindi veniva trattato per produrre i composti chimici.



Un altro modo di classificare le risorse geotermiche è basato sulla temperatura del fluido alla superficie, distinguendo tra bassa ( $< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), media ( $90 \div 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e alta ( $> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) temperatura. Allorché il fluido geotermico viene utilizzato per produrre elettricità, la temperatura di  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  è il limite inferiore per l'impiego di un impianto convenzionale a contropressione (lo scarico del vapore avviene alla pressione atmosferica) oppure a condensazione (scarico del vapore alla bassa pressione del condensatore), mentre, nell'intervallo tra  $170$  e  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , occorre impiegare un impianto a ciclo binario, basato cioè su due fluidi (Figura 11.21).



Fig. 11.20 - Tubazioni in acciaio di grande diametro (fino a  $800\text{ mm}$ ), isolate termicamente, per convogliare all'utilizzazione il vapore estratto dal sottosuolo; sullo sfondo la più potente centrale geotermoelettrica italiana ("Larderello 3" da  $120\text{ MW}$ ) e quattro torri di raffreddamento (ENEL).

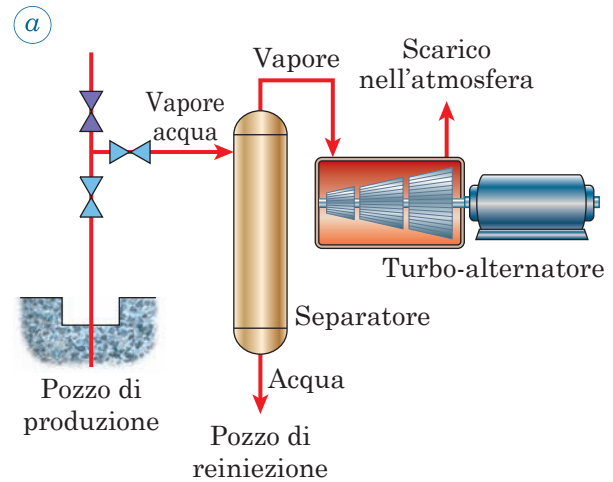
La potenza elettrica generata dagli *impianti a contropressione* è generalmente piuttosto bassa ( $2,5 \div 5\text{ MW}$ ) rispetto a quella degli *impianti a condensazione* (da  $55$  fino a  $110\text{ MW}$ ); così pure, a causa del più basso rendimento, il consumo specifico di fluido di lavoro (kg di vapore)<sup>11.13</sup> per generare il lavoro elettrico (kWh o MJ) è circa doppio:  $4 \div 7\text{ kg/MJ}$  ( $14 \div 25\text{ kg/(kW}\cdot\text{h)}$ ) degli impianti a contropressione contro  $1,5 \div 3\text{ kg/MJ}$  ( $5 \div 11\text{ kg/(kW}\cdot\text{h)}$ ) degli impianti a condensazione. D'altra parte, le unità a contropressione sono molto più semplici, sia per numero di componenti sia per le minori dimensioni, e richiedono un tempo complessivo di realizzazione (costruzione + installazione) sensibilmente inferiore:  $13 \div 15$  mesi contro  $30 \div 36$  mesi di quelle a condensazione.

Gli *impianti binari* operano in circuiti chiusi; i diversi fluidi – geotermico, secondario e di raffreddamento – infatti non hanno contatto con l'esterno. Essi sono realizzati in unità modulari con potenza elettrica unitaria compresa tra  $0,2$  e  $3\text{ MW}$ ; collegati tra loro possono fornire una potenza complessiva fino a  $20 \div 30\text{ MW}$ . Il limite superiore di temperatura ( $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) del fluido geotermico che alimenta l'impianto binario è imposto dalla stabilità termica del fluido secondario, di solito un fluido organico (ad esempio, idrocarburi come n-pentano o isopentano) scelto per avere valori del punto di ebollizione più bassi e della pressione di vapore a bassa temperatura più elevati di quelli dell'acqua. Il limite inferiore di temperatura ( $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) è invece imposto dal costo dei componenti del sistema, soprattutto dallo scambiatore che dovrebbe essere talmente grande da rendere non economica l'applicazione.

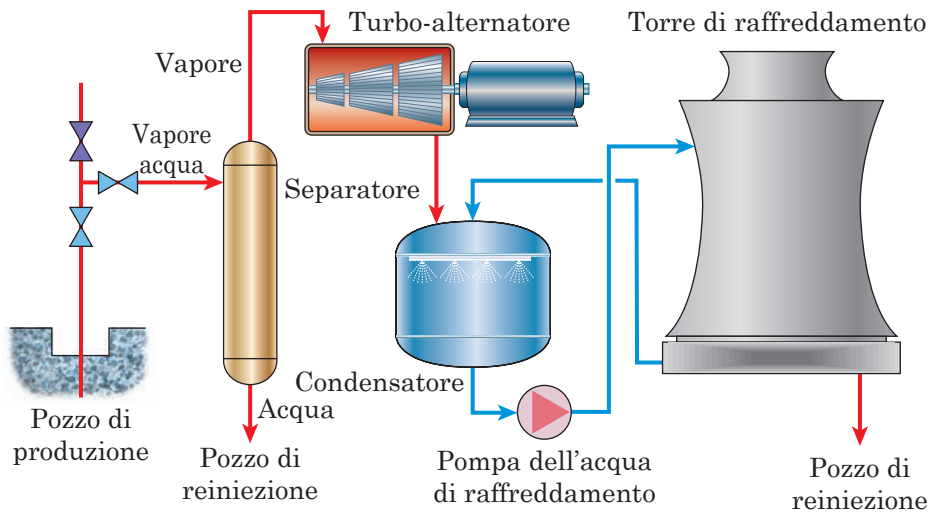
**11.13** - Il consumo specifico di vapore [kg/MJ oppure kg/kWh] è la quantità di vapore necessaria per produrre l'unità di lavoro utile  $w_u$  [MJ/kg oppure kWh/kg] ed è quindi dato da  $1/w_u$ . A causa della bassa temperatura del vapore geotermico, il consumo specifico minimo di vapore citato per l'impianto a condensazione ( $1,5\text{ kg/MJ}$ ) è più alto di quello che in media si riesce a raggiungere con impianti alimentati con combustibili fossili ( $0,6\text{ kg/MJ}$ ); nonostante ciò la produzione di elettricità per via geotermica risulta ancora economicamente conveniente.

Fig. 11.21 - Impianti per la produzione di elettricità con fluidi geotermici (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani). Gli impianti a vapore generano elettricità facendo espandere il vapore in una turbina che fornisce il lavoro meccanico alla macchina elettrica (gruppo turbo-alternatore).

a) Il vapore, dopo la separazione della parte liquida che è mandata al pozzo di reiniezione, viene inviato al turbo-alternatore. L'espansione del vapore si ferma alla pressione atmosferica in modo da poter essere scaricato direttamente nell'ambiente esterno (impianto a contropressione). In rosso è indicato il circuito del fluido geotermico.



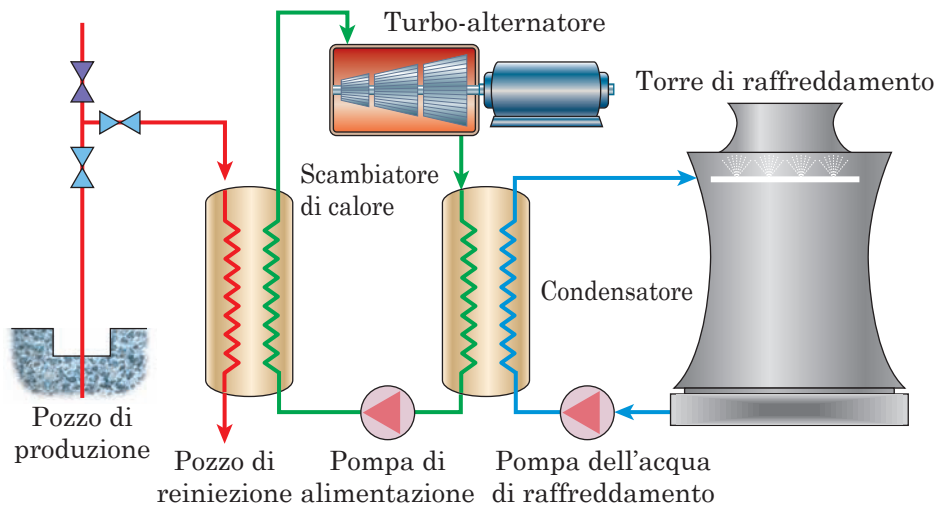
b)



b) Nell'impianto a condensazione, il vapore può continuare l'espansione in turbina fino a valori di pressione sensibilmente più bassi della pressione atmosferica, per la presenza del condensatore. Il vapore scaricato dalla turbina si miscela nel condensatore con l'acqua che proviene dalla torre di raffreddamento. Il condensato viene inviato con una pompa alla torre di raffreddamento, dove, cadendo a pioggia, viene raffreddato dall'aria che sale dal basso e mandato quindi in parte al condensatore a miscela e in parte al pozzo di reiniezione. In rosso, il circuito del fluido geotermico; in blu, il circuito di raffreddamento.

Per aumentare il rendimento complessivo, si può combinare (centrale a *ciclo combinato*) il ciclo dell'impianto convenzionale con quello binario: il fluido geotermico prodotto da un serbatoio ad acqua dominante, passando dalla pressione di prelievo a quella atmosferica, si separa istantaneamente in vapore che viene inviato nella turbina dell'impianto convenzionale a flash singolo mentre l'acqua calda viene mandata allo scambiatore di calore dell'impianto binario prima di essere reiniettata nel serbatoio. Nelle centrali a ciclo ibrido, il fluido geotermico avente una temperatura inferiore a 150 °C viene utilizzato per preriscaldare, mediante uno scambiatore di calore, l'acqua che è poi vaporizzata con il calore fornito da altre fonti, biomasse o combustibili fossili.

c



c) Nell'impianto a ciclo binario il fluido geotermico scambia calore con un fluido secondario avente caratteristiche tali da poter lavorare bene anche a temperature inferiori a 150 °C; dopodiché il fluido geotermico viene rimandato al pozzo di reiniezione. Il fluido secondario, dopo aver generato elettricità nel turbo-alternatore, scambia calore in un condensatore a superficie (cioè senza miscelarsi) con l'acqua di raffreddamento e viene inviato con una pompa di alimentazione allo scambiatore di calore per ricominciare il ciclo. In rosso, il circuito del fluido geotermico; in verde, il circuito del fluido secondario; in blu, il circuito di raffreddamento.

A una temperatura inferiore a 150 °C, il calore fornito dal fluido può anche essere utilizzato direttamente per vari impieghi: riscaldamento urbano, riscaldamento delle serre, balneoterapia, acquacoltura (allevamento controllato di forme di vita acquatiche), alcuni processi industriali ecc. (Figura 11.22). In senso lato, può essere ricondotto ancora alla geotermia (a bassa temperatura) lo sfruttamento del sottosuolo come serbatoio di calore anche in assenza di sorgenti naturali d'acqua calda oppure di zone in cui il terreno ha temperature più alte della media; il terreno infatti, a un metro di profondità, ha normalmente una temperatura costante di circa 10-15 °C lungo tutto il corso dell'anno. La pompa di calore (Figura 10.8-c) sfrutta la differenza di calore fra l'esterno e il suolo o masse d'acqua con temperature comprese tra 5 e 30 °C per assorbire calore e renderlo disponibile agli utilizzatori.

## 11.8 Energia dalle biomasse

Il maggiore problema che si incontra nell'impiego dell'energia solare è la possibilità di poterla accumulare<sup>11.8</sup>, essendo questa più o meno disponibile a seconda delle ore del giorno, delle condizioni del tempo ecc. Questo problema è stato risolto dalle piante che rappresentano il mezzo principe per l'accumulo dell'energia del Sole. Per **biomassa** (*biomass*) si intende ogni sostanza organica derivante direttamente o indirettamente dalla fotosintesi clorofilliana. Mediante questo processo, gli organismi vegetali, durante la loro crescita, utilizzano l'apporto energetico dell'irraggiamento solare per convertire (Figura 11.23) il biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), presente nell'atmosfera, e l'acqua (H<sub>2</sub>O) in ossigeno (O<sub>2</sub>) e sostanza



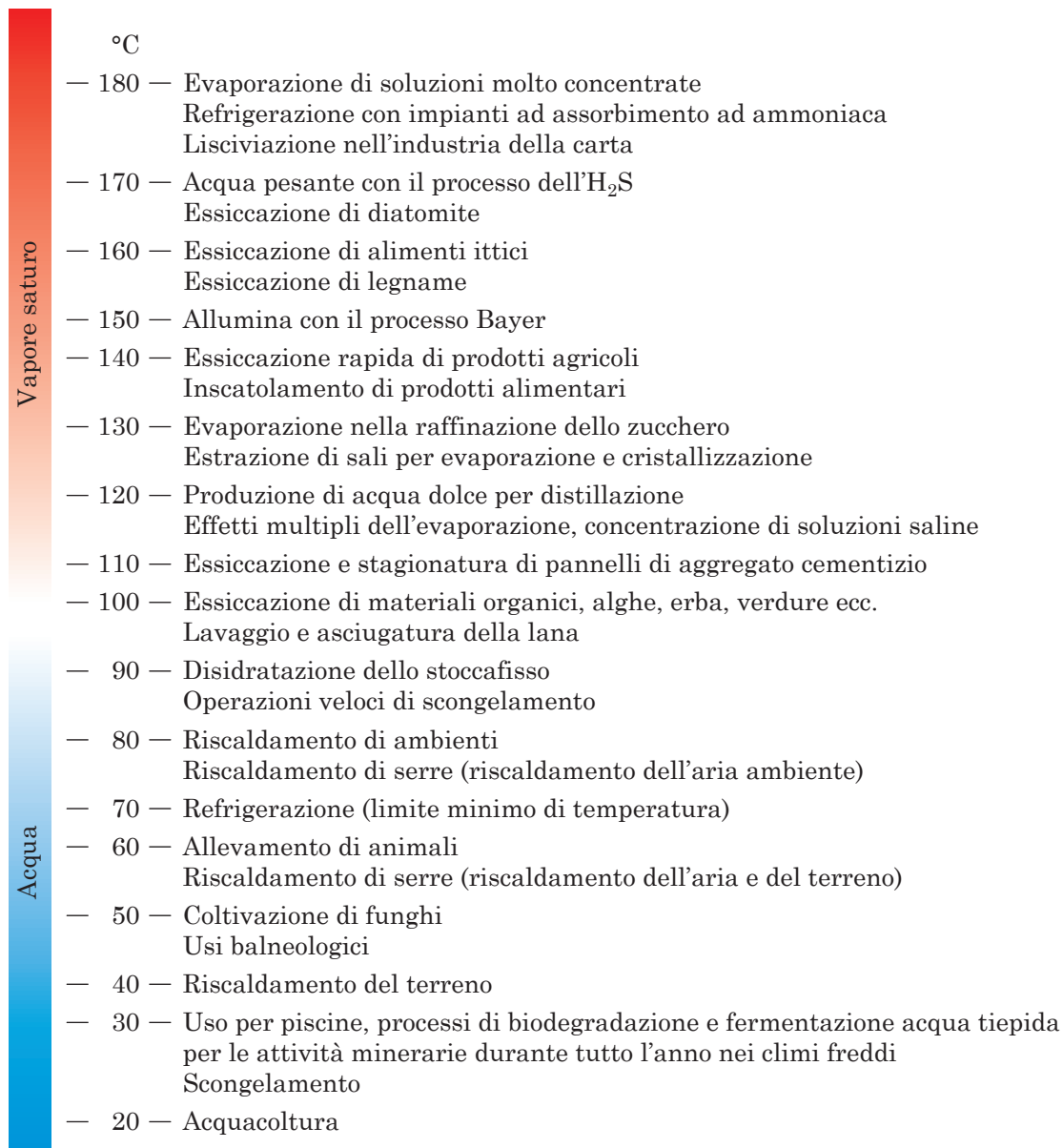


Fig. 11.22 - Diagramma di Lindal con elencati i possibili usi non elettrici dei fluidi geotermici.

organica (carboidrati, lignina, proteine, lipidi ecc.). Vengono così fissate complessivamente circa  $2 \times 10^{11}$  Mg (tonnellate) di carbonio all'anno, con un contenuto energetico equivalente a 70 miliardi ( $10^9$ ) di tonnellate di petrolio [toe]. In senso lato, per biomasse si intendono tutte le sostanze di origine biologica, in forma non fossile, che possono essere utilizzate per la produzione di energia. Oltre alle biomasse di origine forestale e agli scarti dell'industria del legno, vengono quindi inclusi nelle biomasse altri materiali, come le coltivazioni per produrre energia e/o combustibili, le alghe e le colture acquatiche, i residui agricoli, gli effluenti delle industrie agroalimentari, le deiezioni animali, la frazione organica dei rifiuti solidi urbani.

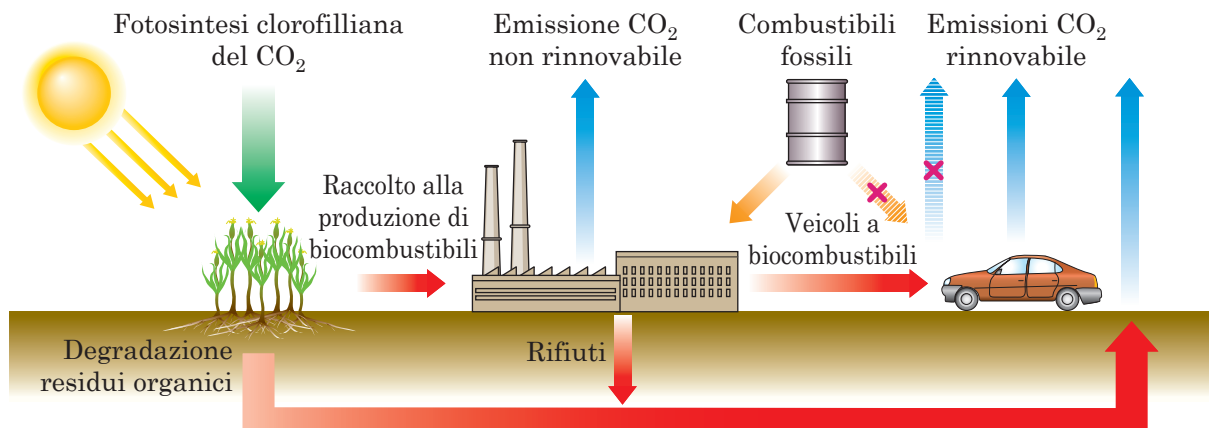


Fig. 11.23 - Biocombustibili e ciclo del carbonio (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani).

Le biomasse si possono considerare risorse rinnovabili nella misura in cui vengano impiegate a un ritmo non superiore alla loro capacità di rinnovarsi biologicamente; così la possibilità di utilizzo di una determinata specie vegetale trova un limite superiore nella superficie coltivabile ad essa destinata, nonché nei vincoli climatici e ambientali che in ciascuna regione determinano la convenienza economica e ambientale di una data coltura. Oltre all'influenza positiva sul contenimento del  $\text{CO}_2$  atmosferico, l'uso delle biomasse si impone in tutti quei casi in cui, anche al di là della resa energetica, rappresentino una soluzione per risolvere problemi ambientali come quello dell'eliminazione dei rifiuti. Le biomasse infatti hanno una modesta densità energetica: il loro potere calorifico<sup>11.2</sup> riferito alla sostanza secca risulta di  $14 \div 18 \text{ MJ/kg}$  contro  $42,0 \text{ MJ/kg}$  del petrolio e  $47,7 \text{ MJ/kg}$  del gas naturale. Inoltre il tenore di umidità delle biomasse è spesso elevato ( $30 \div 40\%$  in massa) per cui in molti processi vanno preventivamente essiccate per poterne sfruttare in modo adeguato il contenuto energetico; un altro valore da tener presente è il rapporto carbonio/azoto (C/N) che in alcuni processi, come la combustione diretta, deve essere superiore a 30.

La domanda di energia relativa alla biomassa, rifiuti inclusi, rappresenta circa il 10,6% della domanda totale, superando di gran lunga la domanda idrica (circa il 2,2%) e le altre risorse rinnovabili (0,5%). Lo sfruttamento delle biomasse interessa tutti i settori dell'economia (in particolare il settore residenziale) producendo combustibili solidi, liquidi e gassosi destinati alla generazione di energia termica/elettrica e alla autotrazione. Vengono utilizzati processi diversi a seconda del tipo di biomassa (*Figura 11.24*):

- Biomasse *lignocellulosiche* come legna, residui forestali (pellet, cippato da *chip* che indica legna frammentata in piccoli pezzi e bricchette), paglia, lolla, pula, gusci ecc.:
  - *combustione diretta*, indirizzata al riscaldamento residenziale e industriale oppure alla produzione di vapore per la generazione di elettricità, con la trasformazione dell'energia chimica contenuta nella biomassa in energia termica;
  - *co-combustione (co-firing)* con cui la biomassa viene impiegata in parziale sostituzione dal 5 al 15% di un combustibile fossile, di solito polverino di carbone, per la produzione di elettricità, vapore o cemento;

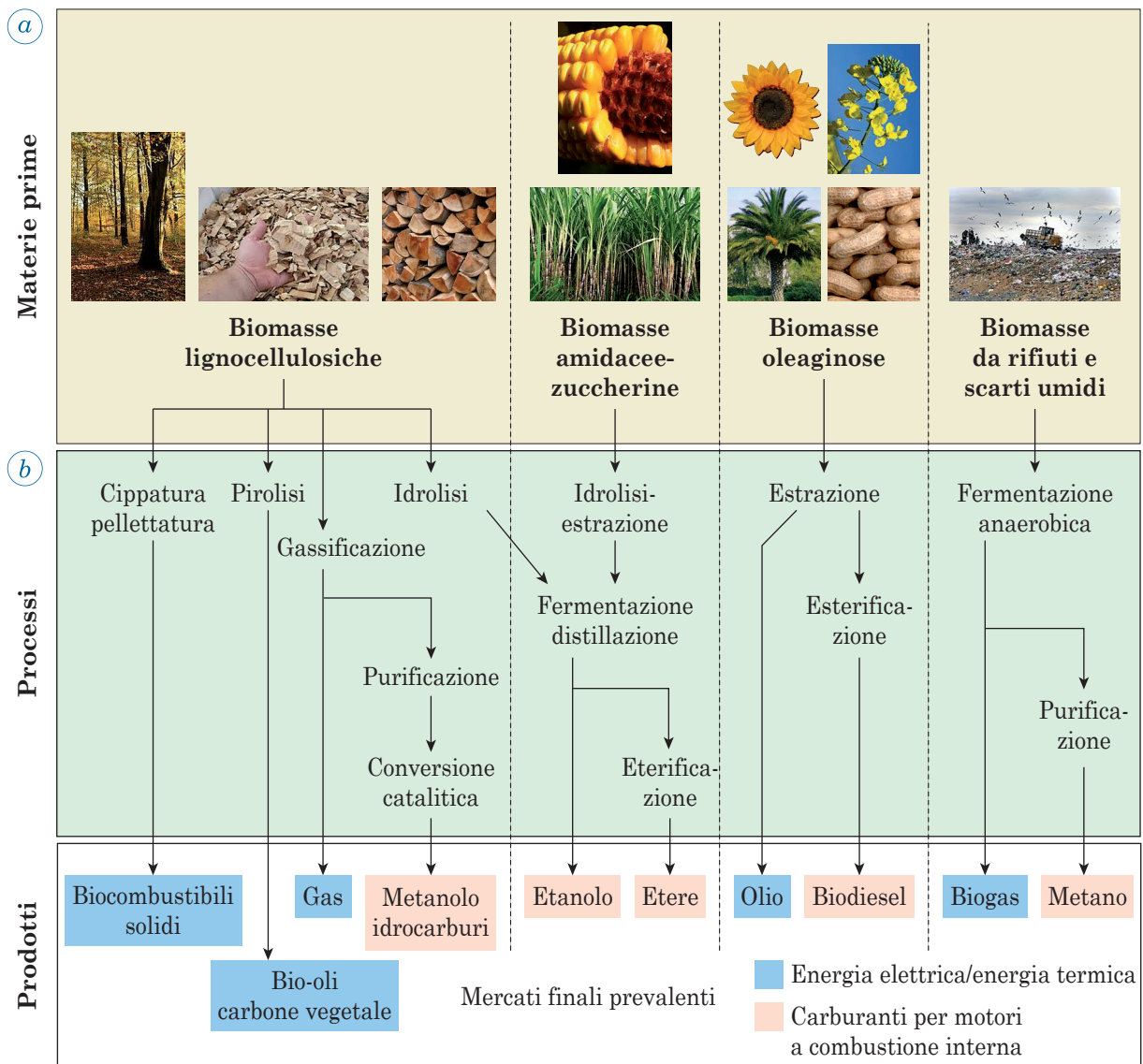


Fig. 11.24 - a) Le biomasse utilizzate come materie prime per la produzione di energia elettrica/termica oppure come carburanti per motori a combustione interna.

b) Dalle materie prime contenute nelle biomasse ai prodotti (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani).

- *pirolisi*, processo di decomposizione termica a temperatura elevata (300 ÷ 700 °C) in assenza di ossigeno, che consente di ottenere prodotti solidi (carbone vegetale) e combustibili liquidi, più facilmente trasportabili della biomassa solida, come gli oli da pirolisi o bio-oli;
- *gassificazione*, processo analogo alla combustione ma che avviene in difetto di ossigeno, con la conversione del combustibile solido in un combustibile gassoso (gas di sintesi) oppure, con un ulteriore trattamento in presenza di un catalizzatore, in metanolo (CH<sub>3</sub>OH) e idrocarburi;

- *idrolisi enzimatica* di materiali cellulosici e fermentazione (successiva o contemporanea) degli idrolizzati zuccherini con produzione di etanolo ( $C_2H_5OH$ ).
- Biomasse *amidacee*, come il mais e la patata, e *zuccherine*, come la barbabietola e la canna da zucchero:
  - *fermentazione* con produzione di etanolo ( $C_2H_5OH$ ) oppure di eteri, in particolare l'etilterziariobutil etere (ETBE), utilizzati solitamente in miscela con la benzina come carburanti.
- Biomasse *oleaginose*, come gli oli vegetali di colza, girasole, soia, arachidi, palma ecc.:
  - *estrazione* degli oli e successiva conversione chimica in miscele di *esteri* metilici e/o etilici come il biodiesel (*Figura 11.25*) utilizzato come carburante in miscela con il gasolio.
- Biomasse da *rifiuti* organici urbani, liquami zootecnici, residui alimentari e vegetali:
  - *Fermentazione (o digestione) anaerobica*, demolizione di molecole organiche complesse in assenza di ossigeno (anaerobica) a opera di microorganismi, con produzione di biogas composto principalmente da biossido di carbonio ( $CO_2$ ) e metano ( $CH_4$ ); il biogas può essere bruciato in caldaia per il teleriscaldamento oppure può essere purificato in modo da avere solo metano per l'alimentazione di motori a combustione interna.

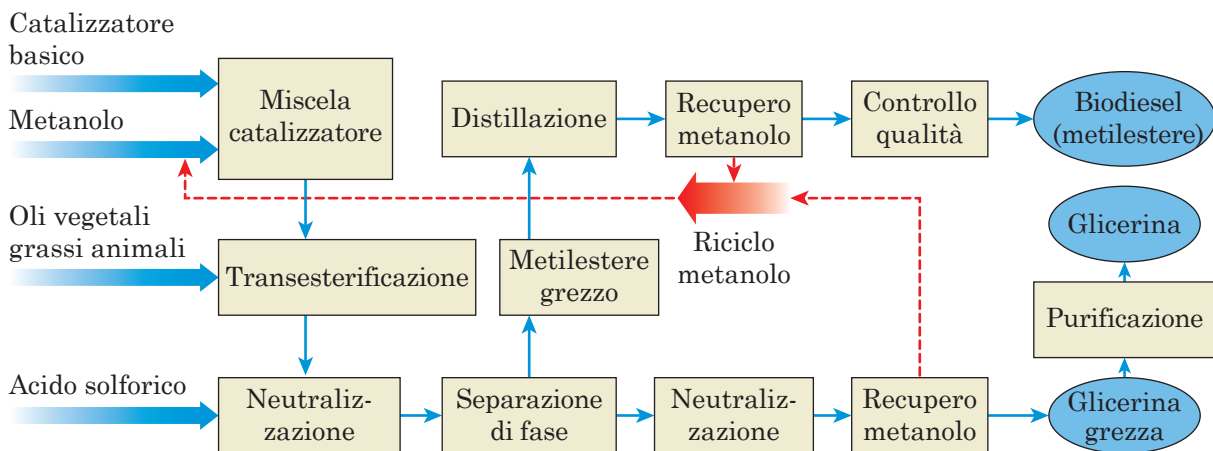


Fig. 11.25 - Schema a blocchi del processo produttivo del biodiesel (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani). Il biodiesel è costituito da esteri metilici ed etilici di acidi grassi prodotti attraverso una reazione di transesterificazione; in questo processo oli vegetali e animali sono fatti reagire con un eccesso di alcol (di solito l'alcol metilico o metanolo  $CH_3OH$ ) in presenza di un catalizzatore. Il bilancio di massa è: 1000 kg di olio raffinato + 100 kg di metanolo = 1000 kg di biodiesel + 100 kg di glicerina, con la glicerina sottoprodotto di questo processo.

Le biomasse utilizzate, come materie prime, nella produzione dei biocarburanti sono biomasse pregiate, importanti dal punto di vista alimentare; si pensi ai cereali, alla canna e alla barbabietola da zucchero dai quali viene ricavato per fermentazione/distillazione il bioetanolo utilizzato nei motori ad accensione comandata e agli oli vegetali (colza, girasole, soia ecc.) dai quali viene ricavato per esterificazione il biodiesel utilizzato nei motori ad accensione per compressione. Queste biomasse vanno sostituite (*Figura 11.26-a*), come materie prime, da biomasse non pregiate, prevalentemente lignocellulosiche come scarti di coltivazioni agricole, residui dell'industria di legno/carta, colture specifiche ad alta cadenza

produttiva ecc., per arrivare con un processo di idrolisi e fermentazione al bio-etanolo (*Figura 11.24-b*) oppure con un processo prima di gassificazione della biomassa in gas di sintesi e quindi con un processo successivo (Fischer-Tropsch) di conversione catalitica del gas di sintesi a metanolo e idrocarburi (*Figure 11.24-b e 11.26-b*). Quest'ultima tecnologia di gassificazione della biomassa per ottenere alla fine un liquido si chiama BtL (*biomass to liquid*); la tecnologia per il passaggio diretto dal metano al liquido si chiama invece GtL (*gas to liquid*).

- Biodiesel (semi di colza)
- Etanolo (grano, barbabietola da zucchero)



- Da biomassa a liquido
- Etanolo da cellulosa



Fig. 11.26-a - Evoluzione delle materie prime utilizzate per la produzione di carburanti; si passa da sostanze pregiate utilizzate per la produzione di cibo (fotografia a sinistra) a prodotti di scarto (fotografia a destra) non utilizzabili in altro modo con i seguenti vantaggi:

- alto contributo alla riduzione del CO<sub>2</sub>;
- nessuna interferenza nella catena alimentare;
- alte produzioni per ettaro.

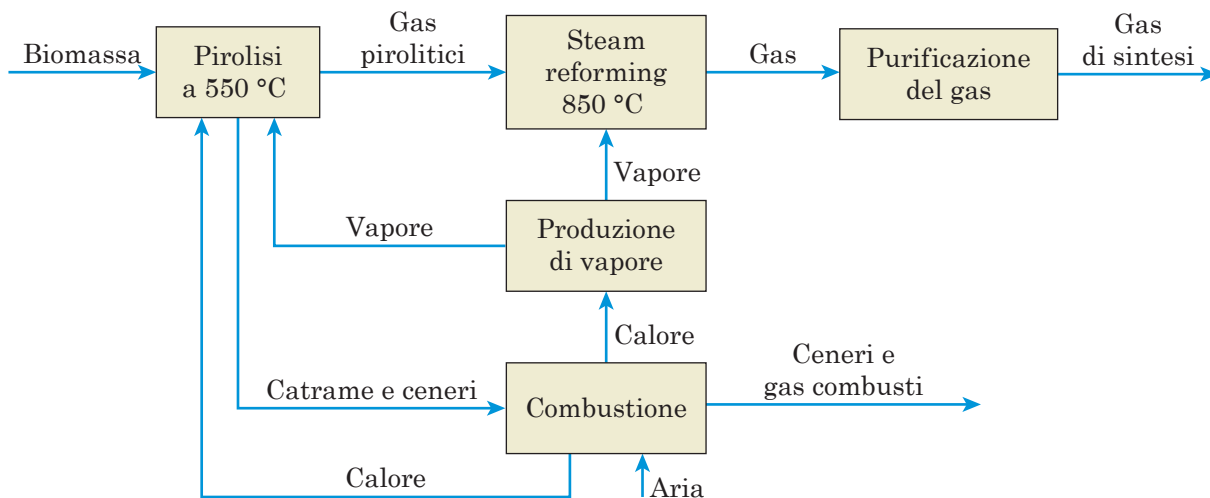


Fig. 11.26-b - Oltre alla gassificazione citata nella *Figura 11.24-b*, è possibile generare il gas di sintesi anche trattando i gas pirolitici con vapor d'acqua. Il gas di sintesi (*syngas*), miscela di monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H<sub>2</sub>), va poi convertito cataliticamente in metanolo e idrocarburi con il processo Fischer-Tropsch (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani).

## 11.9 Energia dai rifiuti urbani

L'insieme di tutto ciò che viene scartato o avanzato dalle attività dell'uomo costituisce i **rifiuti** (*waste*)<sup>11.14</sup>. Oltre alla definizione europea, possono venire classificati in modi diversi: in base all'origine, ad esempio rifiuti urbani o rifiuti da attività agricole; in base alla pericolosità, rifiuti pericolosi e non pericolosi; in base al loro stato fisico, ad esempio solidi oppure liquidi, e così via. La gestione del ciclo vitale dei rifiuti – raccolta, trasporto, trattamento nei due aspetti di riciclaggio o smaltimento e il riutilizzo dei materiali di scarto – deve avere come obiettivo quello di ridurne, il più possibile, gli effetti sulla salute dell'uomo e sull'ambiente. Pertanto, il primo livello di attenzione va indirizzato alla necessità di prevenire la formazione dei rifiuti: è la filosofia dei rifiuti zero per cui si progetta il ciclo di vita delle risorse in modo che tutti i prodotti possano essere riutilizzati. Un esempio può essere il ciclo di vita di una bottiglia di vetro per il latte: la risorsa di partenza è la silice da cui si ricava il vetro e quindi la bottiglia; la bottiglia viene riempita con latte e venduta al consumatore; a questo punto il ciclo normale dovrebbe essere quello di venire smaltita in una discarica, ma, se alla bottiglia di latte venisse associato un deposito di 0,50 € da riconoscere al consumatore nel momento in cui restituisce la bottiglia, questa potrebbe poi essere lavata, riempita nuovamente di latte e quindi rivenduta. L'unico materiale perso risulterebbe così l'acqua che è servita per lavarla.

Una minore attenzione all'ambiente, ma sempre meglio dello smaltimento nella discarica, è lasciar cadere la bottiglia di vetro in un apposito contenitore: la bottiglia si romperà, ma il vetro potrà essere riutilizzato. È la *raccolta differenziata* che prevede, per ogni tipologia di rifiuto solido urbano, una prima selezione da parte dei cittadini, in modo da ridurre la quantità di residuo non differenziabile da portare in discarica o da trattare con inceneritori e, nello stesso tempo, isolare da una parte i rifiuti inquinanti (come medicinali, batterie, solventi) e recuperare dall'altra parte, mediante il riciclaggio dei rifiuti, tutte le materie prime riutilizzabili, come, ad esempio, alluminio, carta, plastica e vetro. La raccolta differenziata diventa una necessità nel momento in cui problemi ecologici e di difesa ambientale rendono sempre più difficile reperire nuove aree per le discariche tradizionali di tipo indifferenziato, purtroppo ancora oggi molto diffuse in Italia, dove occorre smaltire una produzione media di rifiuti per abitante attorno a 1,7 kg al giorno.

I rifiuti indifferenziati (possono essere quelli della discarica tradizionale oppure i residui indifferenziati che rimangono dopo la raccolta differenziata) vengono poi trattati a freddo per recuperare un'ulteriore parte di materiali riciclabili, ridurre il volume del materiale per facilitarne lo smaltimento finale e stabilizzare i rifiuti in modo da ridurre la formazione di percolato, liquido con inquinanti derivanti dai processi biologici e fisico-chimici all'interno delle discariche. Un derivato del trattamento a freddo è anche il biogas, che costituisce la forma di energia più importante derivata dai rifiuti (si veda il paragrafo sulle biomasse). Il principale tipo di trattamento a freddo consiste nel trattamento meccanico-biologico (TMB), che permette di separare la parte organica dai materiali riciclabili e di produrre un combustibile derivato dai rifiuti (RDF, *refuse derived fuel*). Tre sono i processi di base del trattamento a caldo dei rifiuti: combustione, pirolisi e gassificazione (gli ultimi due sono descritti nel paragrafo dedicato alle biomasse). Il processo di gran lunga più dif-

---

11.14 - I rifiuti vengono definiti dall'Unione Europea (Direttiva n. 2008/98/CE del 19 novembre 2008) come sottoprodotti e, in particolare, qualsiasi sostanza o oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi.



fuso è la combustione ad alta temperatura attuata mediante l'inceneritore, impianto che dà come prodotti finali gas, ceneri e polveri. Negli impianti più moderni (*Figura 11.27*), il calore sviluppato durante la combustione dei rifiuti viene recuperato<sup>11.15</sup> per produrre vapore, utilizzato per generare elettricità e/o calore per il teleriscaldamento.

**11.15** - Termovalorizzatore, usato talvolta per sottolineare il recupero energetico operato dall'inceneritore, è un termine fuorviante, poiché le teorie sulla corretta gestione dei rifiuti affermano che gli unici modi per "valorizzare" un rifiuto sono prima di tutto il riuso e poi il riciclo, mentre l'incenerimento costituisce semplice smaltimento e, nella graduatoria degli interventi sui rifiuti, si trova soltanto a un gradino al di sopra dell'ultimo: discarica di rifiuti indifferenziati. Di fatto, termovalorizzatore è un termine che non viene mai utilizzato nella normativa europea di riferimento, nella quale si parla solo di "inceneritore".



Fig. 11.27 - Inceneritore di Osaka.

## // 11.10 Vettori energetici e celle a combustibile

Per poter soddisfare la domanda finale – riscaldamento, trasporti, industria, servizi ecc. – le fonti di energia primaria, rinnovabili e non, devono essere trasformate in energia secondaria. È vero che per alcune applicazioni la fonte primaria può essere utilizzata direttamente, si pensi al gas naturale quando impiegato nel riscaldamento oppure come carburante sui motori ad accensione comandata, ma quasi sempre occorre introdurre forme di energia che possano garantire il miglior collegamento possibile tra la disponibilità delle fonti energetiche primarie e l'utilizzazione specifica. Il petrolio greggio, che di per sé non ha praticamente alcun uso diretto, va, ad esempio, lavorato in raffineria per arrivare a produrre benzina e gasolio impiegati nel trasporto; il successo del petrolio, quale fonte energetica primaria, è appunto dovuto al fatto che i suoi derivati, essendo liquidi, possono essere facilmente trasportati, immagazzinati e distribuiti. Un esempio di energia secondaria innovativa è rappresentata dai biocombustibili che consentono l'effettiva utilizzazione dell'energia primaria messa a disposizione dalle biomasse. È proprio nell'ambito del collegamento tra fonte primaria e sua utilizzazione che i portatori di energia (*energy carriers*) o vettori energetici giocano il loro ruolo. Di particolare interesse sono quei vettori che si prestano a essere trasportati e facilmente rilasciano l'energia all'utilizzatore finale; produzione, trasporto, stoccaggio e uso finale sono gli aspetti che definiscono la qualità del vettore. In questo paragrafo verranno esaminati in particolare due vettori energetici: l'elettricità che è alla base dello sviluppo di qualsiasi economia e l'idrogeno ( $H_2$ ) che viene considerato il vettore energetico del futuro.

### Energia elettrica

L'*energia elettrica* è il vettore energetico per eccellenza; la sua diffusione è un indice del livello raggiunto da un'economia. La domanda di energia elettrica continuerà a crescere nei prossimi anni, sia nei Paesi industrializzati sia nei Paesi in via di sviluppo. Nel 2008

erano 1,5 miliardi di persone a non avere accesso all'elettricità; si prevede che nel 2030, nonostante la prosperità più diffusa e la tecnologia più avanzata, il 16% della popolazione mondiale (1,3 miliardi) non avrà ancora accesso all'elettricità (*Figura 11.28*).

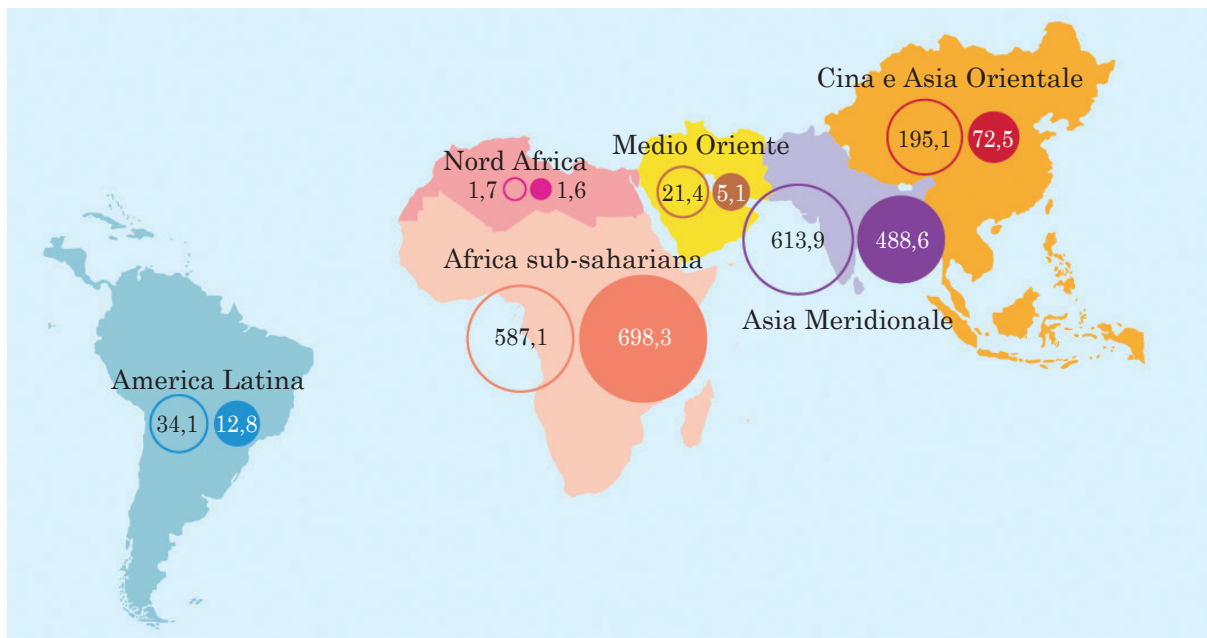


Fig. 11.28 - Popolazione (in milioni) senza accesso all'elettricità nel 2008 (cerchio vuoto) e nel 2030 (cerchio pieno) nelle diverse aree geografiche; in totale, a livello mondiale, 1,5 miliardi nel 2008 e 1,3 miliardi nel 2030 (*International Energy Agency*).

**Produzione** – L'energia elettrica presenta il pregio di poter venir prodotta da quasi tutte le fonti di energia primaria – fossili (petrolio, gas naturale e, soprattutto, carbone), nucleare e rinnovabili (idroelettrica, eolica, fotovoltaica) – sia su grande che su piccola scala.

**Trasporto e distribuzione** – L'energia elettrica viene trasmessa in modo efficiente dalle centrali di generazione all'utenza con linee classificate ad:

- alta o altissima tensione per lunghissime distanze;
- a media tensione con cavi interrati in aree urbane oppure linee sospese in città o in aree suburbane per utenze medie industriali e commerciali;
- a bassa tensione per la distribuzione alle piccole utenze.

**Stoccaggio** – È il punto critico dell'energia elettrica che, una volta raggiunta l'utenza di destinazione, deve essere consumata immediatamente. Tecnologie, come gli ultracapacitori e i magneti superconduttori per durate di frazioni di secondo oppure di volani per durate dell'ordine del secondo, consentono di sopperire alle variazioni/interruzioni di elettricità. Volendo garantire la continuità della fornitura di energia elettrica per intervalli di tempo prolungati, dai minuti alle ore, occorre accumulare l'energia mediante il ripompaggio dell'acqua nei bacini idroelettrici, il pompaggio di aria compressa e le batterie a elettrolita fluido. I sistemi di stoccaggio basati sulle batterie trovano però la principale barriera negli elevati costi di investimento che ne limitano l'applicazione a mercati di nicchia.

*Uso finale e impatto sull'ambiente* – L'energia elettrica viene impiegata in tutti i settori dell'economia con un impatto ambientale sul luogo di utilizzazione praticamente nullo. Ma la valutazione dell'impatto non va mai disgiunta dalla tipologia della fonte primaria impiegata per la generazione dell'energia elettrica; risulta così estremamente diversa la valutazione complessiva delle emissioni allorché l'energia elettrica è stata generata in una centrale alimentata a carbone oppure da un pannello fotovoltaico.

## Idrogeno

Anche lo stoccaggio dell'idrogeno ( $H_2$ ) presenta problemi, ma dovrebbe essere, in linea di principio, di più facile soluzione di quelli dell'energia elettrica. Si potrebbe così risolvere l'intermittenza di generazione dell'energia elettrica propria delle fonti di energia rinnovabile: si produce idrogeno con le fonti rinnovabili, lo si immagazzina e poi, al momento voluto, lo si può trasformare in energia elettrica. La combustione dell'idrogeno è una combustione pulita con produzione di acqua ( $H_2O$ ); l'unico inquinante è rappresentato dagli ossidi di azoto ( $NO_x$ ), che si formano in condizioni di elevata temperatura a causa dell'azoto ( $N_2$ ) presente nell'aria, mentre sono totalmente assenti tutti quei composti del carbonio – idrocarburi incombusti (indicati come HC), monossido di carbonio (CO) e biossido di carbonio ( $CO_2$ ) – caratteristici delle fonti fossili. Si può così immaginare una futura economia dell'idrogeno basata su fonti rinnovabili, contrapposta all'attuale economia del carbonio basata sulle fonti fossili (Figura 11.29).

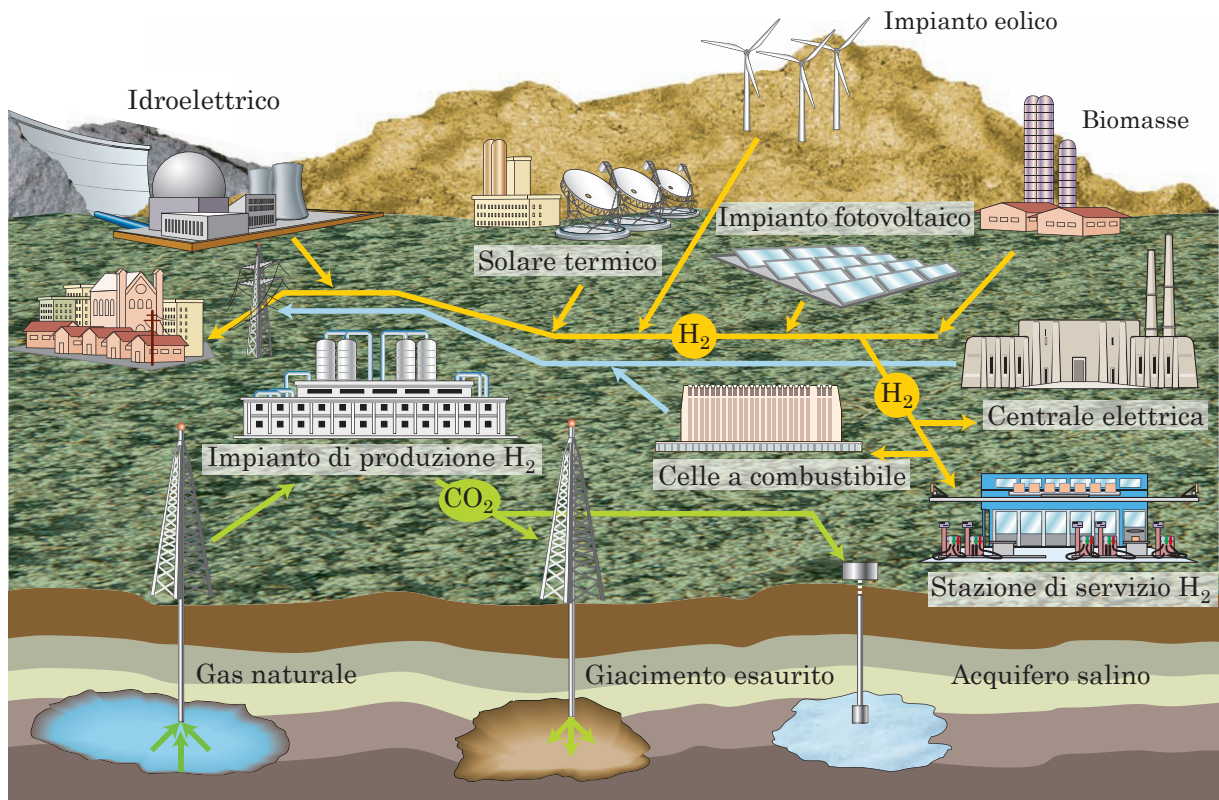


Fig. 11.29 - Sistema energetico integrato basato sulla futura economia dell'idrogeno. Reti di idrogeno locali vengono utilizzate per alimentare veicoli con motori a combustione interna o a celle a combustibile. Si osservi come il biossido di carbonio ( $CO_2$ ), generato nella combustione di un combustibile fossile come il gas naturale, venga sequestrato e immesso in cavità sotterranee (giacimento esaurito e acquifero salino).

*Produzione* – L'idrogeno può essere prodotto sia da fonti non rinnovabili, fossili e nucleari, sia da fonti rinnovabili mediante processi termochimici direttamente dall'acqua  $H_2O$  (produzione di idrogeno  $H_2$  e ossigeno  $O_2$  utilizzando il calore e il ciclo di reazioni di alcuni elementi chimici come il ciclo zolfo-iodio) oppure mediante elettrolisi dell'acqua passando attraverso la produzione intermedia di elettricità.

*Trasporto e distribuzione* – Si può immaginare un sistema di gasdotti analogo a quello del metano con la differenza della minore densità energetica ( $10.800 \text{ MJ/m}^3$  dell'idrogeno contro  $36.000 \text{ MJ/m}^3$  del metano), di materiali più sofisticati per evitare fenomeni di infragilimento e di stazioni di compressione adeguate a causa di un diverso comportamento dei due gas in fase di compressione. A questo sistema centralizzato dovrebbe affiancarsi un sistema di distribuzione locale dell'idrogeno generato su piccola scala presso le stazioni di servizio.

*Stoccaggio* – L'idrogeno può essere immagazzinato allo stato gassoso come il metano; anche utilizzando pressioni più elevate di quelle con cui viene immagazzinato il metano (70 MPa contro 22 MPa) in modo da tener conto della minore densità energetica dell'idrogeno, l'impiego a bordo di veicoli comporta un aumento inaccettabile di peso, volume e costi. La liquefazione alla temperatura di  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$  (contro i  $-162 \text{ }^\circ\text{C}$  del metano) risolve il problema della densità di energia dell'idrogeno, ma la complessità nel maneggiare l'idrogeno liquido (si pensi alla stazione di lancio dei veicoli spaziali a Cape Canaveral), le perdite durante lo stoccaggio e l'energia richiesta per la liquefazione (pari a un terzo del contenuto energetico dell'idrogeno) sconsigliano l'operazione. Grosse quantità di idrogeno possono essere conservate sfruttando composti chimici ricchi di idrogeno, come gli idruri alcalini, il metanolo e l'ammoniaca, i quali, consegnati alle stazioni di distribuzione per la generazione sul posto di idrogeno, potrebbero così risolvere anche i problemi della distribuzione su base locale. Un esempio di idruro alcalino è l'idruro di litio  $LiH$  che reagendo con l'acqua  $H_2O$  forma idrogeno  $H_2$  (12% in massa) e idrossido di litio  $Li(OH)$  ( $LiH + H_2O \Rightarrow H_2 + Li(OH)$ ) che va poi riciclato con un costo aggiuntivo per il suo recupero. La decomposizione catalitica del metanolo  $CH_3OH$  dà una molecola di monossido di carbonio (CO) e due di idrogeno  $2H_2$  ( $CH_3OH \Rightarrow CO + 2H_2$ ); inoltre il CO per reazione successiva con acqua ( $H_2O$ ) dà un'altra molecola di  $H_2$  ( $CO + H_2O \Rightarrow CO_2 + H_2$ ): in definitiva dal metanolo si ottiene il 18,75% in massa di idrogeno.

*Uso finale e impatto sull'ambiente* – L'applicazione più interessante dell'idrogeno, proprio per le emissioni nulle e per l'alto rendimento, è l'uso diretto nelle celle a combustibile, che sono trattate di seguito.

## **Cella a combustibile**

La *pila* o *cella*<sup>11.16</sup> *a combustibile (fuel cell)*, è nata in Inghilterra nell'Ottocento. Sir William Robert Grove comprese per primo che, se era possibile, usando l'elettricità, separare per elettrolisi l'acqua in idrogeno e ossigeno, doveva essere vero anche l'opposto: generare l'elettricità combinando idrogeno e ossigeno. L'idea di Grove venne presto abbandonata in favore della meno costosa motrice alternativa a vapore alimentata con combustibili fossili. Quando negli anni Sessanta del secolo scorso la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) iniziò a sviluppare i sistemi per la prima missione prolungata dell'uomo nello spazio, un punto importante era la generazione di elettricità a bordo della navicella

---

**11.16** - In italiano, vengono utilizzati indifferentemente i termini "cella" e "pila" a combustibile. Sarebbe più corretto riservare il termine di "cella" alla cella elettrochimica elementare che nel momento in cui viene connessa in serie alle altre celle (*stack*) diventa una pila a combustibile in grado di fornire la tensione adeguata all'utilizzazione richiesta.



spaziale. Le batterie furono scartate perché inadatte per dimensioni, peso e tossicità a sostenere una missione di otto giorni nello spazio. Il fotovoltaico non era praticabile allora a causa delle dimensioni e del peso dei pannelli solari. L'unica soluzione rimase quella della cella a combustibile. Da allora, la ricerca sulle celle a combustibile si è sviluppata rapidamente perché universalmente considerate una sorgente di energia pulita.

Il modo più semplice per capire il funzionamento di una cella a combustibile è quello di confrontarlo con una comune batteria. Ambedue producono elettricità attraverso reazioni elettrochimiche. La differenza sta nella capacità della cella a combustibile di generare elettricità in modo continuo fin tanto che viene alimentata con il combustibile mentre la batteria richiede di essere ricaricata, cosicché la cella a combustibile converte direttamente il combustibile in elettricità là dove una batteria va periodicamente ricaricata con una sorgente esterna di elettricità. Una cella a combustibile (*Scheda 11.1*) consiste di due elettrodi, uno positivo (l'anodo) e uno negativo (il catodo), posti attorno a un elettrolita (*Figura 11.30*). Il combustibile, sotto forma di idrogeno (il combustibile potrebbe anche essere diverso, ad esempio metanolo  $\text{CH}_3\text{OH}$ , ma va prima convertito in idrogeno per poter alimentare la cella), giunge all'anodo e l'ossigeno al catodo. Attivati da un catalizzatore, gli atomi di idrogeno si separano in protoni ed elettroni, che raggiungono il catodo seguendo due diversi percorsi: gli elettroni passano attraverso un circuito esterno generando un flusso di elettricità, i protoni migrano attraverso l'elettrolita al catodo dove si riuniscono con l'ossigeno e gli elettroni per produrre acqua e calore. Le celle a combustibile possono essere usate per la propulsione di veicoli oppure per produrre elettricità e calore agli edifici. La tensione di ogni singola cella è circa 0,7 V (sotto carico); nell'uso normale si impiega una molteplicità di celle elementari connesse in serie (*stack*) per ottenere tensioni di uscita più elevate (la tensione risultante sarà così 0,7 V moltiplicato per il numero delle celle). Le celle a combustibile, ne esistono di diversi tipi<sup>11.17</sup>, possono raggiungere un rendimento piuttosto elevato, fino al 70%.

La cella a combustibile con maggiori prospettive di industrializzazione, candidata a sostituire la cella con elettrolita alcalino della *Scheda 11.1* nelle applicazioni terrestri sia stazionarie sia veicolari, è la *cella a membrana a scambio protonico* (PEM) in grado di lavorare a basse temperature (tra 50 e 90 °C). Al contrario di altre celle che impiegano elettroliti liquidi, l'elettrolita PEM è un composto organico solido molto sottile (spessore di pochi fogli di carta per fotocopie) con la consistenza di una plastica morbida. Il materiale più comune utilizzato per una membrana PEM è il Nafion della DuPont, polimero simile al Teflon come composizione chimica. La membrana va mantenuta umida usando dell'acqua per poter trasportare i protoni idrogeno (non bisogna superare i 90 °C per evitare di far evaporare l'acqua) e deve essere molto sottile per non ridurre il flusso. Nel funzionamento della cella:

- l'idrogeno gassoso ( $\text{H}_2$ ) in pressione alimenta l'anodo;
- tra l'anodo e l'elettrolita PEM, un catalizzatore a base di platino, accelera la separazione dell'idrogeno gassoso in due elettroni ( $e^-$ ) e due protoni ( $\text{H}^+$ );
- i protoni  $\text{H}^+$  attraversano la membrana umida PEM e vanno al catodo;
- gli elettroni, non potendo attraversare l'elettrolita PEM, devono uscire dalla cella e arrivano al catodo generando una corrente elettrica;

---

**11.17** - I diversi tipi di celle a combustibile vengono abitualmente classificati a seconda del tipo di elettrolita impiegato; così si hanno le celle a combustibile alcaline (AFC, *Alkaline Fuel Cell*), a membrana a scambio protonico (PEM, *Polymer Electrolyte Membrane*), ad acido fosforico (PAFC, *Phosphoric Acid Fuel Cell*), a ossido solido (SOFC, *Solid Oxide Fuel Cell*) e a carbonato fuso (MCFC, *Molten Carbonate Fuel Cell*). Queste tipologie si differenziano principalmente per la temperatura di funzionamento che va da 80 ÷ 90 °C delle alcaline e delle celle a membrana a circa 1000 °C delle celle a ossido solido.

- aria in pressione alimenta il catodo;
- un catalizzatore al platino tra il catodo e il PEM accelera la separazione dell'aria in molecole di ossigeno;
- tutti e tre gli elementi (protoni idrogeno, elettroni di ritorno e molecole di ossigeno) si combinano al catodo e formano una molecola d'acqua (H<sub>2</sub>O).

### Scheda 11.1

**Cella a combustibile.** La cella a combustibile con elettrolita alcalino utilizzata nelle missioni Apollo e sullo *Space Shuttle*. Questo tipo di cella a combustibile non può essere impiegato sulla Terra perché non tollera la presenza del biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) presente nell'atmosfera.

Nel recipiente vi è una soluzione di idrossido di potassio (KOH con ioni potassio K<sup>+</sup> e ioni idrossili OH<sup>-</sup>). In due compartimenti separati, al fine di evitarne la reazione esplosiva, si procede all'alimentazione continua, funzione del loro consumo, di idrogeno H<sub>2</sub> a sinistra e di ossigeno O<sub>2</sub> a destra. Sull'elettrodo positivo il combustibile H<sub>2</sub> viene ossidato dagli ioni OH<sup>-</sup> provenienti dall'idrossido di potassio:



All'elettrodo negativo il comburente O<sub>2</sub> viene ridotto:



I quattro elettroni (4e<sup>-</sup>), prodotti dalla reazione 1, raggiungono (a sinistra in *Figura 11.30*) il circuito esterno e rientrano, a destra, dove riducono l'ossigeno con la reazione 2. Dal compartimento di destra, essi ritornano, attraverso la regione delimitata dai due elettrodi porosi, nel compartimento di sinistra legati ai quattro ioni (4OH<sup>-</sup>), chiudendo in tal modo il circuito.

Gli ioni idrossili si spostano in modo continuo dal catodo all'anodo, mentre l'acqua si genera in modo opposto. Il bilancio globale delle due reazioni precedenti è espresso dalla reazione di sintesi dell'acqua:



Trattandosi di reazioni piuttosto lente, è necessario far uso nella pila a combustibile di catalizzatori costosi (nickel, platino ecc.).

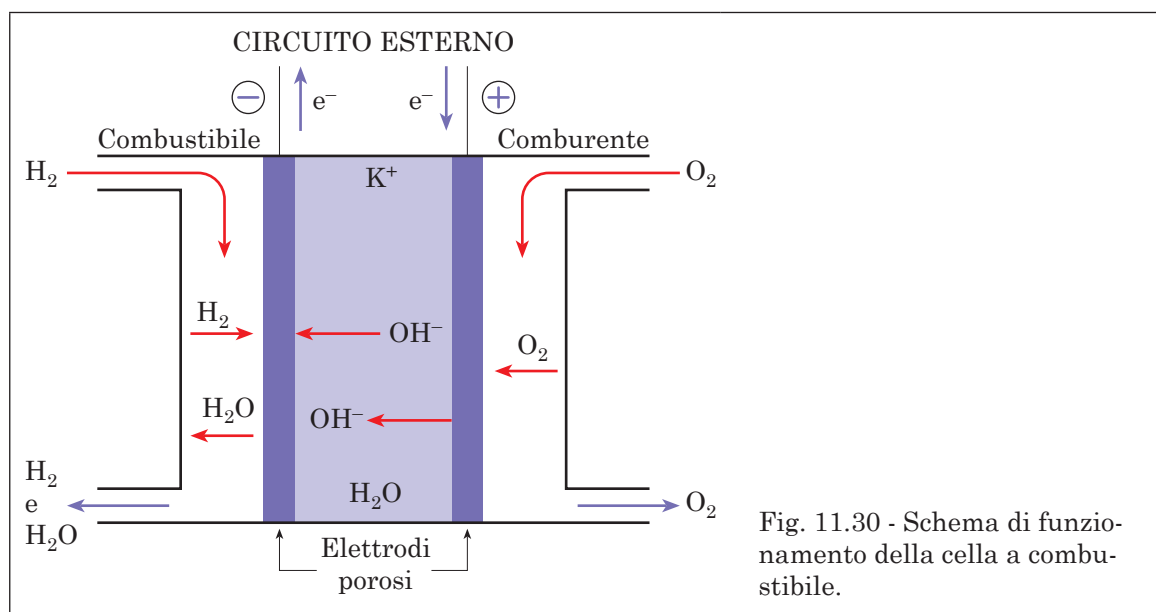


Fig. 11.30 - Schema di funzionamento della cella a combustibile.

## SINTESI

Le *fonti di energia primaria* si suddividono in fonti *non rinnovabili*, come quelle derivate dai combustibili fossili, e fonti *rinnovabili*, come l'energia dell'acqua, del vento, del sole e dal sottosuolo. A parte l'energia ricavata da fiumi e bacini, le fonti rinnovabili sono *innovative*, hanno un potenziale enorme e vanno sviluppate per ridurre la dipendenza dalle fonti non rinnovabili.

L'energia  $E$  è il prodotto della massa  $m$  del combustibile per il suo potere calorifico  $HV$ . La potenza  $P$  è data dall'energia  $E$  diviso il tempo  $t$ . Oltre al joule, viene usata anche la tonnellata di petrolio equivalente [toe = 42 GJ]. Ricordare che toe è l'equivalente di tep (vedi nota 11.3).

$$E = m \cdot HV \quad \text{e} \quad P = \frac{E}{t} \quad 11-1$$

$E$  = energia [J]  
 $m$  = massa [kg]  
 $HV$  = potere calorifico [J/kg]  
 $P$  = potenza [W]  
 $t$  = tempo [s]

Tra i *combustibili fossili*, è il *petrolio* la fonte di energia più utilizzata in quanto economicamente più conveniente e più facilmente trasportabile perché liquido. Altri combustibili sono il *gas naturale* che, quando distante dal luogo di utilizzo, viene liquefatto per essere riportato allo stato gassoso nel rigassificatore, e il *carbone*, che è la risorsa più abbondante. La quarta sorgente di *energia non rinnovabile* è il *nucleare*.

L'azione del vento sulla superficie marina determina la formazione delle *onde* con potenze medie per metro di fronte d'onda di circa 80 kW/m nell'oceano e di 22 kW/m nel Mediterraneo. Il flusso e il riflusso della *marea* muta l'altezza dell'acqua in prossimità della costa offrendo così la possibilità di generare energia sfruttando le variazioni di altezza dell'acqua.

L'energia *solare* può essere utilizzata per generare calore, mediante il pannello *termico* oppure quello *a concentrazione*, ed elettricità con il pannello *fotovoltaico*.

L'energia *eolica* si utilizza trasformando l'energia cinetica del vento in energia elettrica. Nell'antichità si utilizzavano i mulini a vento sfruttando l'energia meccanica ricavata dall'asse delle pale per effettuare operazioni di tipo diverso come la macinatura dei cereali, il sollevamento dell'acqua ecc. Attualmente si fa uso di aerogeneratori o pale eoliche, che muovono direttamente un alternatore per la produzione dell'energia elettrica.

L'energia *geotermica* contenuta nell'acqua calda e nel vapore, estratti dal sottosuolo, viene impiegata per produrre elettricità oppure per il riscaldamento urbano.

Lo sfruttamento delle *biomasse*, sostanze di origine vegetale e/o animale, consente di produrre combustibili solidi, liquidi e gassosi destinati alla generazione di energia termica/elettrica e all'autotrazione. Dai rifiuti organici urbani, liquami zootecnici e residui si ottiene il *biogas*.

Due vettori energetici di particolare interesse sono l'*elettricità*, che è alla base dello sviluppo di qualsiasi economia, e l'*idrogeno*, che viene considerato il vettore energetico del futuro. La *cella a combustibile* è in grado di produrre con rendimento elevato elettricità in modo continuo fin tanto che viene alimentata con il combustibile.



## ESERCIZI

**11.1** - Assegnato un potere calorifico medio del petrolio  $HV = 42 \text{ MJ/kg}$ , calcolare qual è l'energia  $E$  in gigajoule [GJ] equivalente a una massa  $m = 1$  tonnellata di petrolio.

$$E = 42 \text{ GJ}$$

**11.2** - Tenendo conto che un barile contiene una massa di petrolio  $m = 136 \text{ kg}$ , calcolare la potenza termica  $P$  [GW] fornita in un giorno da 1 milione di barili di petrolio avente potere calorifico  $HV = 42 \text{ MJ/kg}$ .

$$P = 66,1 \text{ GW}$$

**11.3** - Calcolare l'energia  $E$  ottenibile in un anno per una superficie di  $1 \text{ m}^2$  da un valore della radiazione solare di  $290 \text{ W/m}^2$ .

$$E = 2505,6 \text{ kW}\cdot\text{h} = 9020,2 \text{ MJ}$$

**11.4** - Calcolare l'energia  $E$  in megajoule [MJ] sviluppata da una massa  $m = 100 \text{ kg}$  di legno avente un potere calorifico  $HV = 15 \text{ MJ/kg}$ .

$$E = 1500 \text{ MJ}$$

**11.5** - Calcolare la potenza termica  $P$  [kW] fornita in un tempo  $t = 7$  giorni da un volume  $V = 10.000 \text{ m}^3$  di gas naturale avente una massa volumica  $\rho = 0,83 \text{ kg/m}^3$  e un potere calorifico  $HV = 47,7 \text{ MJ/kg}$ .

$$P = 654,61 \text{ kW}$$

**11.6** - Trasformare l'energia  $E = 21 \text{ PJ}$  (petajoule) in tonnellate di petrolio equivalenti [toe].

$$E = 500.000 \text{ toe}$$

**11.7** - Calcolare l'energia  $E$  fornita da 1 milione di barili di petrolio prima in megatone [Mtoe] e poi in petajoule [PJ], considerando una massa  $m = 136 \text{ kg}$  del petrolio contenuto in un barile e assumendo un potere calorifico del petrolio  $HV = 42 \text{ MJ/kg}$ .

$$E = 0,136 \text{ Mtoe} = 5,7 \text{ PJ}$$

**11.8** - Trasformare l'energia  $E = 10 \text{ ktoe}$  [kilotoe] in terajoule [TJ].

$$E = 420 \text{ TJ}$$

**11.9** - Calcolare la potenza  $P$  di un aerogeneratore a due pale (Figura 10.8-b) che eroga l'energia  $E = 94 \text{ GJ}$  nel tempo  $t = 522 \text{ h}$ .

$$P = 50 \text{ kW}$$

**11.10** - Il consumo specifico di combustibile *sfc* (*specific fuel consumption*) di un motore a combustione interna è il rapporto tra la massa  $m_f$  di combustibile che alimenta il motore e l'energia  $E_{\text{out}}$  che esce dal motore ( $sfc = m_f/E_{\text{out}}$ ). Sapendo che il consumo specifico di un motore ad accensione per compressione vale  $sfc = 198 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ , trasformare prima il consumo in  $\text{kg/MJ}$  e poi, sapendo che il potere calorifico del combustibile (gasolio) è  $HV = 43,3 \text{ MJ/kg}$ , calcolare il rapporto tra l'energia che entra  $E_{\text{in}}$  [MJ] e l'energia che esce  $E_{\text{out}}$ . Determinare infine il rendimento  $\eta$ .

$$sfc = 0,055 \text{ kg/MJ}; \\ E_{\text{in}}/E_{\text{out}} = 2,3815; \eta = 0,42$$

## VERIFICA DEI PREREQUISITI

1. L'unità di misura dell'energia è il watt. Vero  Falso
2. Scrivere a quanti J (joule) equivalgono rispettivamente: 1 kJ (kilojoule) ....., 1 MJ (megajoule) ....., 1 GJ (gigajoule) ..... e 1 EJ (exajoule) .....
3. L'unità di misura della massa nel sistema SI è:
  - a) N (newton)
  - b) K (kelvin)
  - c) g (grammo)
  - d) kg (kilogrammo)
4. La massa di 1 tonnellata corrisponde a ..... kg e si indica con .....
5. Operando sugli esponenti, scrivere il risultato del prodotto delle seguenti potenze di 10:  
 $10^3 \times 10^6 \times 10^9 =$  .....
6. A quanti GJ (gigajoule) equivale l'energia di 2.180.000 kJ (kilojoule)? .....
7. Indicare le due grandezze fisiche che caratterizzano il funzionamento di una macchina elettrica e le relative unità di misura: .....
8. Scrivere il nome accanto ai seguenti elementi:
  - a) H<sub>2</sub> .....
  - b) O<sub>2</sub> .....
  - c) N<sub>2</sub> .....
9. Scrivere il nome accanto ai seguenti composti:
  - a) H<sub>2</sub>O .....
  - b) CO<sub>2</sub> .....
  - c) CH<sub>4</sub> .....
  - d) CO .....
  - e) CH<sub>3</sub>OH .....
  - f) C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH .....
10. In un ospedale si verifica un guasto alla linea elettrica esterna; interviene il gruppo elettrogeno di emergenza di potenza pari a 250 kW che fornisce per 4 ore l'energia di:
  - a) 1000 kW·h
  - b) 62,5 kW/h
  - c) 3600 kJ
  - d) 3600 MJ

## VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

1. Le riserve di carbone sono maggiori di quelle di petrolio. Vero  Falso

2. Elencare almeno 3 energie rinnovabili innovative:

.....

3. Elencare i tre motivi per i quali le fonti rinnovabili innovative non sono state fino ad ora utilizzate su larga scala:

- .....
- .....
- .....

4. Nella combustione l'azoto dell'aria si combina con il carbonio e l'idrogeno dei combustibili fossili.

Vero  Falso

5. Il prodotto della combustione dei combustibili fossili che esercita un'influenza particolarmente negativa sull'ambiente:

a) vapor d'acqua

b) biossido di carbonio

6. Citare due dispositivi per il recupero di energia dal moto ondoso: .....

..... e .....

7. I tre tipi di pannelli per l'utilizzo dell'energia solare sono: .....

..... e .....

8. L'aerogeneratore ad asse verticale è più complesso e quindi costoso di quello ad asse orizzontale.

Vero  Falso

9. I tre elementi che formano un sistema geotermico sono: .....

..... e .....

10. Mediante la fotosintesi clorofilliana gli organismi vegetali utilizzano l'apporto energetico dell'irraggiamento solare per convertire .....

.....

.....

11. Esempi di biomasse lignocellulosiche: .....

.....

12. Esempi di biomasse oleaginose: .....

13. Il biogas è il risultato della digestione anaerobica di biomasse da .....  
.....  
ed è composto (principalmente) da .....
14. Con la filosofia di rifiuti zero si progetta il ciclo di vita delle risorse in modo che .....
15. L'energia secondaria è un'energia di minore importanza rispetto alle altre forme di energia.  
Vero  Falso
16. Il vettore energetico attualmente più importante è .....
17. Il vettore energetico del futuro potrebbe essere .....
18. Il punto critico dell'energia elettrica è:  
a) produzione  
b) trasporto e distribuzione  
c) stoccaggio  
d) uso finale e impatto sull'ambiente
19. La cella a combustibile genera l'elettricità combinando idrogeno e ossigeno.  
Vero  Falso
20. La principale differenza tra una cella a combustibile e una batteria consiste nel fatto che la cella a combustibile va periodicamente ricaricata con una sorgente esterna di elettricità, mentre la batteria è in grado di generare elettricità in modo continuo fin tanto che viene alimentata dal combustibile.  
Vero  Falso