

1 Le fonti di energia

Dopo aver classificato le varie fonti di energia disponibili sulla Terra ne diamo ora una dettagliata descrizione, mettendone in evidenza le caratteristiche principali e le possibilità di impiego per soddisfare il fabbisogno energetico mondiale.

1.1 Combustibili fossili

In natura i combustibili fossili sono presenti nei seguenti stati fisici:

- solido (carbone ecc.);
- liquido (petrolio ecc.);
- gassoso (metano ecc.).

a) Combustibili fossili solidi

I combustibili fossili solidi sono presenti in giacimenti molto estesi che si sono formati decine di milioni di anni fa. Hanno avuto origine da residui vegetali sottoposti a una serie di trasformazioni in diverse condizioni di pressione e di temperatura e in presenza o meno di ossigeno.

In base al contenuto percentuale di carbonio e idrogeno, i combustibili fossili solidi sono stati classificati in:

- torba;
- lignite;
- antracite;
- litantrace.

Per ciascuno di questi combustibili devono essere considerate alcune caratteristiche che ne determinano la qualità e quindi il valore commerciale. Esse sono: il *potere calorifico*, ossia la quantità di calore sviluppata nella combustione completa di 1 kg di combustibile, e il contenuto in *umidità*, *ceneri*, *zolfo* e *sostanze volatili*.

Le sostanze volatili sono i prodotti che si liberano, come gas e vapori, durante la combustione e quanto maggiore è il contenuto in sostanze volatili di un combustibile, tanto più lunghe ci appaiono le fiamme sviluppate nella combustione. I carboni *a lunga fiamma* sviluppano molte sostanze volatili, quelli *a corta fiamma* ne sviluppano meno.

I *costituenti essenziali* dei vari tipi di combustibile sono comunque sempre il *carbonio* e l'*idrogeno* che, durante una combustione completa, portano alla formazione di anidride carbonica CO_2 e vapor d'acqua. Tutti gli altri elementi presenti in un combustibile diminuiscono il suo valore economico come, ad esempio, lo zolfo che ritroviamo nei prodotti della combustione sotto forma di anidride solforosa SO_2 , dannosa per l'ambiente.

Figura 1
Torbiera.



A causa dell'alto prezzo del petrolio, si tenderebbe oggi a sfruttare maggiormente il carbone come fonte alternativa nel settore industriale. L'uso di questo combustibile però viene limitato da problemi di trasporto e, soprattutto, di inquinamento atmosferico dovuto alla presenza di SO_2 e di ceneri nei fumi di scarico.

Le *torbe* sono i combustibili più scadenti e derivano da vegetali quasi sempre palustri accumulati in depositi, detti *torbiere* (Figura 1), aventi uno spessore anche di alcuni metri.



Figura 2
Lignite.



Figura 3
Antracite.



Figura 4
Litantrace.

La torba è un combustibile di modeste qualità in quanto è caratterizzato da un elevato contenuto di umidità (oltre il 90% di acqua), un basso contenuto di carbonio ($50 \div 60\%$), un alto tenore in ceneri ($30 \div 50\%$) e infine un basso potere calorifico ($12\,500 \div 21\,000$ kJ/kg).

Le *ligniti* (**Figura 2**) provengono generalmente da una fossilizzazione di piante arboree, oppure si sono formate da residui più minuti di vegetali (ligniti torbose). Anche le ligniti contengono rilevanti quantità di acqua ($50 \div 60\%$), poco carbonio ($60 \div 70\%$) e un potere calorifico medio di 26 500 kJ/kg.

Le *antraciti* (**Figura 3**) e i *litantraci* (**Figura 4**) sono carboni più pregiati e costituiscono i combustibili più importanti e di maggiore consumo nel settore industriale, specie per la produzione di energia elettrica. Essi si caratterizzano, rispetto ai combustibili solidi visti in precedenza, per un maggiore contenuto in carbonio ($90 \div 95\%$ nelle antraciti, $75 \div 90\%$ nei litantraci), mentre il tenore di idrogeno oscilla mediamente attorno al 5%. Le antraciti e i litantraci si differenziano notevolmente dalle torbe e dalle ligniti perché, anche se immersi nell'acqua, si asciugano in breve tempo per esposizione all'aria. Inoltre per le antraciti il tenore delle sostanze volatili prodotte è sempre inferiore al 10%, mentre il potere calorifico è mediamente pari a 34 000 kJ/kg.

Oltre che direttamente impiegati come combustibili, i carboni fossili possono essere distillati per produrre *coke* e *gas combustibile* (o *gas di città*).

Infatti, riscaldando i litantraci a corta fiamma a una temperatura superiore a 900°C e fuori dal contatto dell'aria, si ottiene come residuo solido il *coke* usato come combustibile anche in metallurgia. Il coke metallurgico per altiforni (**Figura 5**) deve presentare una compattezza e una durezza molto elevate, un alto contenuto di carbonio (95%) e bassi valori percentuali di umidità, ceneri e sostanze volatili. Il potere calorifico del coke metallurgico è mediamente pari a 29 300 kJ/kg.

Se invece si distillano i litantraci a lunga fiamma, oltre al coke residuo si ottengono prodotti gassosi non condensabili. Questi, dopo un'opportuna depurazione, costituiscono il *gas di città*, utilizzato anch'esso come combustibile; il suo potere calorifico vale circa $20\,000$ kJ/Nm³.



Figura 5
Produzione di coke metallurgico per altiforni.

Tra i combustibili solidi non convenzionali ricordiamo:

– alcuni tipi di rifiuti solidi urbani (RSU);



Figura 6
Rifiuti solidi urbani.

- i residui industriali, tra cui i materiali di scarto di aziende alimentari e zootecniche;



Figura 7

Azienda zootecnica dove si produce energia con l'impiego delle deiezioni bovine negli impianti a biogas.

- i residui della produzione agricola;



Figura 8

Scarti agricoli utilizzati per l'autoproduzione di biogas.

- i residui forestali;



Figura 9

Residui forestali: il *cippato* (legno ridotto in scaglie).

- sanse e vinacce.



Figura 10

Sanse di olive (bucce e frammenti di nocciolo).



Figura 11

Vinacce (bucce d'uva).

b) Combustibili fossili liquidi



Figura 12
Petrolio greggio.

I combustibili liquidi più importanti sono ricavati dalla lavorazione del petrolio che si trova sotto la crosta terrestre e presenta una composizione in cui il tenore percentuale di carbonio e idrogeno varia in generale rispettivamente attorno ai valori 87% e 13%.

Il *petrolio* (**Figura 12**) è una miscela di idrocarburi che si trovano soprattutto allo stato liquido e gassoso (paraffine, nafteni, idrocarburi aromatici e non saturi) e si presenta generalmente come un liquido denso, oleoso, vischioso e variamente colorato secondo la provenienza.

Il petrolio ha origine principalmente dal *plancton* che si è accumulato nei millenni e si è depositato sul fondo dei mari e delle paludi mescolato a sedimenti argillosi. Il plancton, costituito da organismi animali e vegetali, è ricco di sostanze organiche che, in assenza di ossigeno, si sono decomposte per effetto combinato di temperatura e pressione e hanno dato origine così ai vari idrocarburi.

Il petrolio *greggio*, cioè grezzo, viene estratto dal sottosuolo mediante una trivellazione del terreno con la quale si mette in collegamento il giacimento con la superficie terrestre (**Figura 13**).

Figura 13
Pozzi petroliferi.



Nella fase iniziale dell'estrazione il petrolio arriva in superficie per effetto della spinta esercitata dalla pressione dei gas presenti nel giacimento; successivamente viene estratto mediante un apposito impianto di pompaggio. I pozzi trivellati per l'estrazione del petrolio vengono rivestiti da tubi di acciaio e possono avere una profondità anche superiore a 5000 metri. Per la perforazione di un pozzo viene costruita un'incastellatura metallica, detta *derrick*, che serve di sostegno alle apparecchiature di trivellazione.

Nel caso di pozzi sottomarini il *derrick* viene sistemato su una *piattaforma* che sarà:

- galleggiante e facilmente spostabile, se si tratta di una piattaforma di perforazione;
- solidale al fondale marino, se si tratta di una piattaforma di produzione.

Lo *scafo* della piattaforma sul quale operano gli addetti all'estrazione del petrolio viene sollevato fino a un'altezza tale da garantire che eventuali onde di tempesta non lo investano (**Figura 14**).



Figura 14
Piattaforma petrolifera di estrazione e di raffinazione del petrolio.

Una nuova, discussa tecnologia di trivellazione: il fracking

Dal 2018, soprattutto negli Stati Uniti e in Arabia Saudita, viene utilizzata una nuova tecnologia di trivellazione (*fracking* o *fratturazione idraulica* o *hydrofracking*) e di estrazione di idrocarburi da strati di materiale argilloso impermeabile (*shale* o *scisti*). Questo sistema ha facilitato l'accesso a nuovi giacimenti e ha permesso di aumentare sensibilmente la produzione petrolifera.

Si tratta di un metodo impiegato per *agevolare la fuoriuscita del petrolio o dei gas* (metano) presenti nelle formazioni rocciose e consentirne un recupero rapido e completo.

Descrizione del fracking

Con piccole cariche esplosive vengono create delle fratture in un pozzo scavato orizzontalmente a 3000 metri di profondità e rivestito con un tubo di cemento (**Figura 15**).

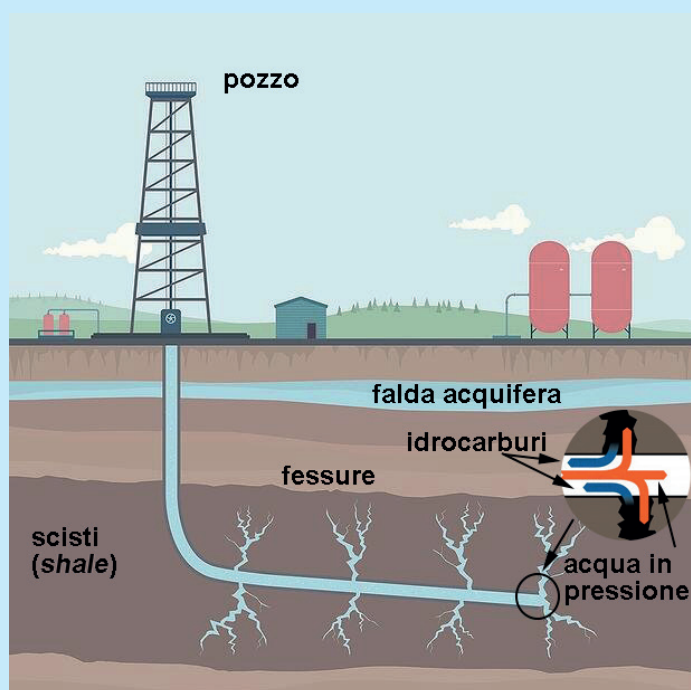
Le fessure così prodotte vengono allargate con l'immissione di grandi quantitativi di *acqua in pressione* e mantenute aperte con sabbia, ghiaia e granuli di ceramica. Gli idrocarburi racchiusi tra questi strati di rocce, una volta resi liberi per effetto del liquido immesso in pressione, risalgono rapidamente lungo il tubo, vengono introdotti nei gasdotti e avviati alla raffinazione.

Questo sistema di estrazione del petrolio presenta gravi rischi, in particolare:

- *contaminazione delle falde acquifere, dell'aria e del terreno*, causata dagli agenti chimici e dai liquidi inquinanti utilizzati per spaccare, impermeabilizzare e tenere aperte le rocce. Si tratta infatti di *agenti cancerogeni e altamente tossici*; alcuni, per giunta, sono anche *radioattivi*;
- *creazione di microsismi* connessi all'attività di fratturazione.

A questo punto è facile rendersi conto di quanto possa essere invasiva, pericolosa e devastante questa tecnica non convenzionale; essa è utilizzata soprattutto per estrarre il metano, gas non facilmente estraibile con le tecniche tradizionali a trivellazione verticale.

Figura 15
Schema della tecnologia di trivellazione *fracking*.



Il petrolio greggio estratto dai giacimenti non è immediatamente utilizzabile, ma deve essere sottoposto a:

1. un processo di *distillazione frazionata*;
2. una successiva *raffinazione*.



Figura 16

Bitume naturale.

Da questi processi si ottengono:

- le benzine (leggere, medie, pesanti);
- il cherosene;
- la nafta;
- il gasolio;
- l'olio lubrificante;
- un residuo pesante dal quale si ricavano:
 - bitume;
 - asfalto.

Bitume e asfalto sono prodotti che si trovano anche in natura (Figura 16, 17).



Figura 17

Giacimento di asfalto.

Con il termine *asfalto* viene abitualmente indicato il conglomerato bituminoso artificiale utilizzato per la pavimentazione stradale.

Il potere calorifico di questi prodotti varia mediamente da 42 a 46 MJ/kg (1 MJ = 10^3 kJ).

Il petrolio greggio subisce i processi di trasformazione nelle *raffinerie* (Figura 18) in cui esso è trasferito dai centri di estrazione.

Il trasporto avviene per mezzo di *oleodotti* (Figura 19). Si tratta di tubazioni di acciaio, di diametro variabile tra i 30 e i 140 cm, saldati tra di loro e con rivestimenti anticorrosione per proteggere il metallo dall'azione aggressiva di acidi, sostanze chimiche e intemperie.

Gli oleodotti sono disposti in superficie o alla profondità di circa un metro e dotati di un adeguato numero di *stazioni di pompaggio* in grado di aumentare la pressione del fluido e spingerlo in avanti.



Figura 18

Raffineria di petrolio.



Figura 19

Oleodotto.

c) Combustibili fossili gassosi

Il *metano* CH_4 è un combustibile fossile presente in molti gas naturali; è un gas che non ha colore né odore. L'odore (agliaceo) percepito dall'utente viene normalmente aggiunto per ragioni di sicurezza, in quanto consente di avvertire nell'aria la presenza del gas prima che si creino condizioni di pericolo per esplosioni e intossicazioni.

Il metano è il principale componente della miscela del gas naturale; è più leggero dell'aria. Assieme al vapore acqueo e all'anidride carbonica è uno dei più importanti *gas serra*, responsabili del surriscaldamento globale della Terra.

Il metano è ricavato:

- per distillazione di combustibili fossili;
- per decomposizione di sostanze organiche, ad esempio per decomposizione di rifiuti solidi urbani nelle discariche;
- in laboratorio, per sintesi;
- da fonti naturali (paludi).

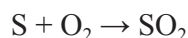
Viene usato come combustibile da solo o in miscela con altri gas. È utilizzato:

- per usi domestici (per cucinare o per scaldare l'acqua sanitaria);
- per il riscaldamento degli edifici a uso civile o industriale;
- per la produzione di energia elettrica, nelle centrali termoelettriche.

Ha caratteristiche molto positive, quali:

1. è privo di residui di combustione, il che comporta una maggiore pulizia e una ridotta manutenzione dei bruciatori (**Figura 20**);
2. rispetto agli altri tipi di combustibile come la benzina e il gasolio, è l'idrocarburo che quando brucia libera la minor quantità di carbonio, benzene e polveri ultrasottili (PM10).

Il metano deve essere depurato, soprattutto dallo zolfo S. Infatti lo zolfo quando brucia produce anidride solforosa SO_2 secondo la reazione:



In presenza di umidità l'anidride solforosa provoca il fenomeno delle *piogge acide* (**Figura 21**), responsabili di malattie polmonari, della rovina delle piante e di tutto ciò che è esposto all'aria.



Figura 20
Bruciatore a gas metano.



Figura 21
Effetti delle piogge acide sulle piante.

Il gas metano, così come gli altri idrocarburi superiori presenti nel gas naturale (quali il propano e il butano), ha un elevato potere calorifico. Il potere calorifico inferiore del metano è di circa 50 MJ/kg, quello del propano e del butano è di circa 46 MJ/kg.

Il GPL

I *gas di petrolio liquefatti* (GPL) sono costituiti essenzialmente da propano e butano.

Come il metano, anche il GPL viene per legge odorizzato; siccome è incolore, viene anche colorato. Il GPL brucia integralmente e lascia pochissime scorie.

Utilizzazioni:

- contenuto in speciali serbatoi sistemati sui veicoli, è impiegato come combustibile per l'autotrazione (**Figura 22**);

- in ambito domestico: per cucinare e riscaldare gli ambienti;
- in ambito agricolo: per il riscaldamento delle serre e degli allevamenti;
- in ambito industriale: nella climatizzazione, nel condizionamento e nella produzione di energia.

Notevoli volumi di gas naturale vengono ottenuti mediante perforazioni nel terreno molto profonde, anche fino a 10 km, ed eseguite sulla terraferma o sul fondo del mare con sistemi tecnologici analoghi a quelli dell'industria petrolifera.

Di solito infatti il gas naturale si trova in zone petrolifere. I giacimenti di petrolio sono quasi sempre ricoperti superiormente da uno strato gassoso; questo gas è imprigionato tra rocce impermeabili che lo comprimono fortemente a una certa profondità al di sotto della superficie terrestre.

Oltre ai gas di origine petrolifera, vi sono anche depositi di gas di origine torbosa contenenti per la maggior parte metano (80 ÷ 90%).

Dai centri di produzione il gas naturale viene trasferito ai luoghi di consumo in parte per via marittima e in parte per via terrestre, ma soprattutto attraverso tubazioni di acciaio (metanodotti, [Figura 23](#)) di notevole diametro e ad una pressione superiore anche ai 50 bar. In tal modo sono eliminate le operazioni di carico, scarico e stoccaggio che sono tipiche per il trasporto di petrolio e carbone.



Figura 22
Bombola GPL per auto.



Figura 23
Metanodotto.

2 Energia nucleare

L'*energia nucleare* è la forma di energia che nasce per effetto di una *reazione nucleare* che consiste in una trasformazione del nucleo di un atomo di un elemento chimico.

2.1 L'atomo

La materia è un aggregato di *atomi*; ogni atomo è costituito da un *nucleo*, dove è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo. Attorno al nucleo ruotano particelle con carica elettrica negativa (*elettroni*). Il nucleo, a sua volta, è formato da particelle con carica elettrica positiva (*protoni*) e da un certo numero di particelle elettricamente neutre (*neutroni*). Il numero di protoni presenti nel nucleo è uguale a quello degli elettroni che orbitano attorno ad esso. Poiché le cariche elettriche (positive) dei protoni e quelle (negative) degli elettroni sono complessivamente uguali, l'atomo risulta elettricamente neutro.

Il numero di neutroni presenti nel nucleo degli atomi di uno stesso elemento chimico non è definito in modo univoco, ma può assumere anche valori diversi. Gli atomi di uno stesso elemento chimico che hanno un diverso numero di neutroni si chiamano *isotopi*. Differiscono tra di loro solo per il diverso numero di neutroni presenti nel nucleo. Ricordiamo ad esempio due isotopi dell'uranio

indicati con i simboli $^{235}_{92}\text{U}$ e $^{238}_{92}\text{U}$. I numeri 235 e 238 indicano il *numero di massa*, cioè la somma dei protoni e dei neutroni presenti nel loro nucleo. I due isotopi hanno lo stesso numero di protoni (*numero atomico*) che per entrambi vale 92. Per quanto riguarda il numero dei neutroni, esso è dato dalla differenza tra il numero di massa e il numero atomico. L'isotopo $^{235}_{92}\text{U}$ ha perciò:

$$235 - 92 = 143 \text{ neutroni}$$

mentre l'isotopo $^{238}_{92}\text{U}$ ha:

$$238 - 92 = 146 \text{ neutroni}$$

Numero di massa e massa atomica: il primo è, come s'è detto, la somma dei protoni e dei neutroni presenti nel nucleo di un certo elemento chimico; la seconda è il numero medio di protoni e neutroni di tutti gli isotopi naturali di quell'elemento.

Gli elettroni, elettricamente negativi, sono legati al nucleo, complessivamente positivo, da forze elettromagnetiche di intensità non elevata. Perciò è sufficiente una modesta quantità di energia per sottrarre gli elettroni alla forza attrattiva del nucleo e trasformare così l'atomo in *ione*. Lo ione, cioè, è un atomo che ha perso o acquistato elettroni rispetto alla configurazione elettronica neutra. È quindi un atomo dotato di carica elettrica, positiva se ha perso elettroni, negativa se ne ha acquistati.

I protoni e i neutroni presenti nel nucleo sono invece legati tra loro da una forza molto più intensa (*interazione forte*); il legame tra protoni e neutroni può essere spezzato solo mediante una *reazione nucleare*. L'energia che si sprigiona da questo tipo di reazione è immensa. L'energia prodotta dal Sole e dalle altre stelle è dovuta alle reazioni nucleari che avvengono nel loro interno.

L'uomo utilizza questa energia per soddisfare i propri bisogni energetici; restano comunque ancora da risolvere numerosi e gravi problemi relativi alla sua produzione.

I processi con cui si ottiene energia nucleare dagli atomi di certi elementi chimici sono: la *fissione nucleare* e la *fusione nucleare*.

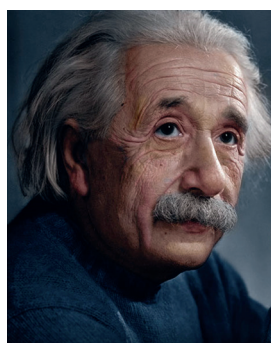
1. Fissione nucleare

La *fissione nucleare* è un processo mediante il quale un nucleo pesante colpito da un neutrone viene disintegrato. Per *nucleo pesante* si intende un nucleo formato da un alto numero di neutroni e protoni, come quello, ad esempio, dell'uranio 235, esistente in natura.

Questa reazione nucleare avviene con emissione di una grande quantità di energia e radioattività.

Lo scontro tra il neutrone e l'atomo provoca la disintegrazione dell'atomo originale e la formazione di due nuovi atomi più leggeri e di neutroni liberi veloci. Questi ultimi possono poi agire come proiettili per ulteriori fissioni di altri atomi e innescare così una *reazione a catena*. Essa proseguirà fino a quando si saranno trasformati tutti gli atomi del *materiale fissile* iniziale. Per *materiale fissile* si intende quel materiale capace di sviluppare una reazione a catena di fissione nucleare.

Al termine della reazione a catena, la somma delle masse dei prodotti finali della reazione è minore della massa complessiva dei reagenti iniziali. E ciò perché una parte della materia si è trasformata in una grande quantità di energia che compare sotto forma di calore.



Albert Einstein
(1879-1955).

Questa trasformazione di una certa massa m in energia E avviene secondo l'equazione di Einstein:

$$E = m \cdot c^2 \text{ (energia = massa} \times \text{il quadrato della velocità della luce)}$$

considerata la base della Teoria della Relatività.

L'energia E è misurata in joule, la massa m in kg e la velocità della luce in m/s. Anche nel caso della scomparsa di una massa m abbastanza piccola si ottiene al suo posto un'enorme quantità di energia E . Infatti le due grandezze sono legate tra loro dal quadrato della velocità della luce nel vuoto ($c = 299\,792\,458$ m/s, cioè circa $3 \cdot 10^8$ m/s), di valore estremamente elevato. Ricordiamo inoltre che una singola fissione libera un'energia assai maggiore di quella liberata da una qualunque reazione chimica. Infatti il legame che viene spezzato in una fissione nucleare è quello che tiene unito il nucleo atomico (*interazione forte*); esso, come abbiamo detto, ha un'intensità assai più elevata, 100 volte superiore a quella delle forze elettromagnetiche che agiscono tra gli elettroni e il nucleo, o tra gli atomi di una molecola.

In ogni fissione di un nucleo di $^{235}_{92}\text{U}$ vengono emessi da 2 a 3 neutroni e viene liberata un'enorme quantità di energia, pari a circa 200 MeV, cioè duecento milioni di elettronvolt. Un elettronvolt è dato dal prodotto della carica di un elettrone per la differenza di potenziale di 1 volt.

L'energia liberata compare sotto forma di calore perché l'energia cinetica dei prodotti della fissione si trasforma in calore a causa degli urti di tali prodotti nella massa di materiale in cui si realizza la reazione nucleare.

La quantità di energia fornita dalla fissione di 1 grammo di ^{235}U in un reattore nucleare è pari a $8,2 \cdot 10^7$ kJ, corrispondente a 23 000 kWh. Questa energia è equivalente a quella ottenuta dalla combustione di circa 2,5 tonnellate di carbone. Nelle centrali nucleari oggi esistenti il calore ottenuto dalla fissione nucleare viene utilizzato per la produzione di vapore ad alta temperatura capace di azionare turbine collegate ad alternatori che producono energia elettrica (Figura 24).



Figura 24
Centrale nucleare.

La tecnologia della fissione nucleare, pur essendo realizzata e applicata in vari Paesi, ha incontrato diverse opposizioni dettate dai rischi di carattere ambientale e sanitario.

I problemi connessi con l'installazione di un impianto nucleare possono derivare da diverse cause, quali:

- possibilità di incidenti al reattore nucleare con conseguenze disastrose, come accadde il 26 aprile 1986 alla centrale nucleare di Chernobyl, in Ucraina, all'epoca una delle repubbliche dell'Unione Sovietica: la fuoriuscita di radioattività contaminò l'ambiente per lunghissimo tempo;
- accumulo e difficile smaltimento di grandi quantità di scorie radioattive, con i relativi, elevati costi di trasporto e di stoccaggio;
- i costi di messa in sicurezza quando si deve procedere allo smantellamento finale della centrale.

D'altra parte, la fissione nucleare comporta i seguenti vantaggi:

- produzione di una grande quantità di energia con piccole quantità di materiale fissile (uranio);
- riduzione della dipendenza energetica dai combustibili fossili;
- minimo impatto sull'effetto serra, poiché non c'è produzione né di metano né di anidride carbonica.

2. Fusione nucleare

La *fusione nucleare* è una reazione nucleare nella quale due o più nuclei di atomi leggeri si uniscono tra di loro e formano il nucleo di un atomo più pesante. Se, ad esempio, si fondono tra di loro quattro nuclei di idrogeno si ottiene un nucleo di elio. È ciò che avviene nel Sole.

La massa del nucleo che si è così formato è leggermente inferiore alla somma delle masse dei nuclei atomici che hanno partecipato alla fusione. Nel corso della reazione si è cioè avuta la scomparsa di una certa quantità di massa. In base alla legge di Einstein è stata perciò liberata una grande quantità di energia, superiore anche a quella ottenuta con la fissione.

La fusione avviene solo se i nuclei di idrogeno sono dotati di un'enorme quantità di energia in modo da portare l'idrogeno per un certo tempo a una temperatura di circa cento milioni di gradi centigradi. Solo così la reazione di fusione si realizza completamente. E queste sono anche le condizioni che si verificano nel Sole.

Da quanto s'è detto, per innescare la fusione nucleare occorre che i nuclei di idrogeno siano dotati di un'enorme energia cinetica e di un'altissima temperatura. In queste condizioni, quando si scontrano tra di loro a velocità estremamente elevate, si fondono e liberano così una grande quantità di energia.

Dopo essere stato innescato, questo processo sviluppa un'energia tale da autosostenersi. Ciò può avvenire se si dispone di una sufficiente quantità di materiale fissile (*massa critica*), tale, cioè, da innescare una reazione a catena.

Il combustibile nucleare più conveniente per la fusione, perché poco costoso e assai diffuso, è il *deuterio* (${}^2\text{H}$), che è un isotopo pesante dell'idrogeno.

Il deuterio è facilmente estraibile dall'acqua marina: questo rappresenta un enorme vantaggio per la realizzazione della fusione nucleare.

Esistono però notevoli difficoltà tecnologiche per l'effettuazione pratica della fusione nucleare, quali:

- la costruzione di un contenitore costituito da un materiale capace di resistere ad altissime temperature;
- la *regolazione* della reazione una volta che essa sia stata innescata.

Vantaggio principale offerto dalla fusione nucleare:

- non produce scorie radioattive come nel caso della fissione; gli scarti di reazione sono infatti atomi di *elio*.

La fusione nucleare è ancora in una fase di ricerca. Si ritiene che dovranno trascorrere ancora molti anni prima di ottenere valide applicazioni pratiche. A Saint Paul lez Durance, nel Sud della Francia, è in fase di costruzione un reattore sperimentale per produrre energia dalla fusione nucleare (Figura 25).

Figura 25

Reattore sperimentale a fusione nucleare in fase di costruzione presso Saint Paul lez Durance, nel Sud della Francia.



Anche se non produce scorie radioattive, la fusione nucleare è una tecnologia non del tutto priva di rischi ambientali. Infatti dalla fusione di due nuclei di deuterio si forma un nucleo di *trizio*, che è un altro isotopo dell'idrogeno. Ma essendo un isotopo radioattivo, è pericoloso; allo stato gassoso può infatti combinarsi con l'ossigeno atmosferico e generare acqua radioattiva.

2.2 Tipi di reattore nucleare a fissione

Un *reattore nucleare* è una macchina che genera energia elettrica mediante il calore prodotto dalla *fissione* nucleare di un combustibile, generalmente una miscela di uranio (**figura 26**).

**Figura 26**

Reattore nucleare.

Le parti che lo costituiscono sono le seguenti:

- *nucleo* o *nocciolo*: zona nella quale avvengono le reazioni controllate di fissione nucleare;
- *barre di combustibile*: tubi sigillati che contengono il combustibile a forma di *pellet*. Sono collocati nel nucleo. In passato erano di acciaio inossidabile, ora sono generalmente in zirconio;
- *fluido refrigerante*, nel quale sono immerse le barre di combustibile: costituito da acqua ordinaria (*acqua leggera* – H_2O) o *acqua pesante* (*Heavy Water* – ossido di deuterio D_2O), assorbe il calore sviluppato dalla reazione nucleare. Spesso il fluido refrigerante ha anche il compito di moderare la velocità dei neutroni liberati dalla reazione, in modo da aumentarne l'efficacia;
- *gruppo turbina-alternatore*: azionato dal vapore prodotto dalla reazione nucleare;
- *barre di controllo*: inserite anch'esse nel nocciolo, fanno in modo che il numero dei neutroni liberati resti costante. Controllano ed eventualmente arre-

stano la reazione a catena in caso di criticità. Evitano cioè che la reazione diventi incontrollata con la conseguente liberazione di enormi quantitativi di energia. Sono realizzate in metallo (ad esempio, leghe di argento) e possono essere estratte totalmente o in parte dal fluido nel quale sono immerse;

– *torri di raffreddamento*: talvolta di dimensioni enormi, servono a raffreddare l'acqua utilizzata nel reattore prima che sia riversata nuovamente nel fiume o nel lago dai quali è stata tolta.

Va detto che il combustibile nucleare deve essere in quantità sufficiente (*massa critica*) per rendere stabile la reazione a catena e fare in modo che essa si auto-sostenga.

Escludendo i reattori detti *veloci* in cui viene utilizzato l'isotopo ^{238}U dell'uranio (^{238}U), tutti i reattori nucleari utilizzano l'isotopo ^{235}U (^{235}U).

Tra i vari tipi di reattore che utilizzano la fissione nucleare, i più diffusi sono due:

1. i reattori ad acqua bollente BWR (*Boiling Water Reactor*);
2. i reattori ad acqua pressurizzata PWR (*Pressurized Water Reactor*).

Il refrigerante e moderatore impiegato in questi reattori è acqua *ordinaria* H_2O , oppure acqua *pesante* o deuterata D_2O . Tra i due tipi di acqua il moderatore più efficace è l'acqua pesante, ma poiché è molto costosa e difficile da produrre spesso si preferisce utilizzare l'acqua ordinaria. In questo caso però il reattore viene alimentato con uranio *arricchito* artificialmente, cioè prodotto in impianti particolari dove l'uranio naturale viene portato da una percentuale di isotopo fissile ^{235}U di 0,7% fino a circa il 3%.

I reattori funzionanti a uranio arricchito e moderati con acqua ordinaria hanno il vantaggio dello spegnimento automatico della reazione quando si verifica una perdita di refrigerante nel nocciolo. Lo spegnimento avviene in quanto, a causa della mancanza di acqua, i neutroni diventano più veloci e non vengono più catturati dal nucleo di uranio ^{235}U .

1. Reattori ad acqua bollente BWR

I reattori BWR o *ad acqua bollente*, detti anche *a ciclo diretto*, sono costituiti da un nocciolo N composto da barre cilindriche contenenti biossido di uranio UO_2 e dalle barre mobili di controllo della reazione nucleare, capaci di assorbire neutroni; le barre sono mantenute in posizione verticale da una struttura di sostegno in acciaio (Figura 27).

Le barre del nocciolo sono lambite dall'acqua refrigerante che nel suo moto verso l'alto assorbe il calore prodotto dalla fissione del combustibile. L'acqua è così trasformata in vapore che viene inviato direttamente nella turbina T dove si espande e aziona la turbina e l'alternatore A. Il vapore scaricato dalla turbina entra nel condensatore C dove ritorna allo stato liquido; infine l'acqua uscente dal condensatore viene rimandata dalla pompa P nel reattore R e rientra in circolo.

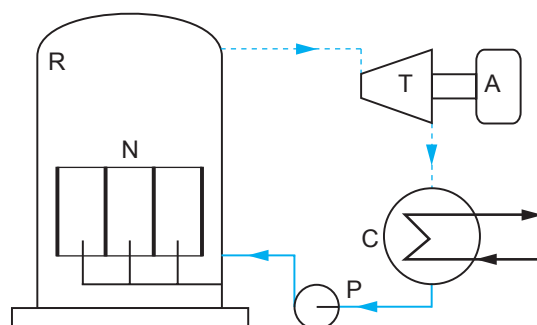


Figura 27
Schema del reattore BWR.

Nei reattori BWR vi è un unico circuito dell'acqua; di conseguenza il fluido refrigerante diventa radioattivo perché entra in contatto con il combustibile nucleare. Perciò:

- le tubazioni che trasportano il vapore devono essere schermate;
- gli impianti possono essere soggetti a manutenzione soltanto nei periodi di inattività e solo dopo che la radioattività si sia completamente azzerata.

Il più grave incidente ipotizzabile in un reattore nucleare è la fusione del nocciolo. Essa avviene quando il calore prodotto dal reattore è maggiore di quello che viene asportato dal sistema di refrigerazione; di conseguenza il nocciolo radioattivo inizia a fondere. Può addirittura arrivare a rompere sia il *sarcofago* di acciaio che lo circonda sia la *gabbia di contenimento* in cemento armato e a rilasciare nell'ambiente circostante prodotti radioattivi.

La fusione del nocciolo di un reattore BWR può avvenire, come s'è detto, a causa di un'insufficiente refrigerazione; ciò potrebbe accadere:

- per un minore flusso del refrigerante;
- per una caduta di pressione del fluido refrigerante.

2. Reattori ad acqua pressurizzata PWR

I reattori PWR o *ad acqua pressurizzata*, detti anche *a ciclo indiretto*, hanno:

- un *circuito primario*, in cui circola acqua ad alta pressione che può così raggiungere temperature elevate senza vaporizzare. Il circuito primario è costituito da un recipiente in pressione R che contiene il nocciolo (Figura 28). L'acqua serve sia per raffreddare sia per moderare la velocità dei neutroni liberati dalla reazione, in modo da aumentarne l'efficacia;
- un *circuito secondario* nel quale, attraverso uno scambiatore di calore, si utilizza il calore dell'acqua del circuito primario per produrre vapore. Il vapore viene successivamente inviato alla turbina per l'azionamento dell'alternatore A e la produzione di energia elettrica.

La caratteristica principale di questo tipo di reattore è la separazione dei due circuiti, *primario* e *secondario*, che fa in modo che alle turbine e al condensatore giunga acqua non radioattiva.

I reattori PWR sono costituiti da:

- un *nocciolo* N, simile a quello dei reattori BWR;
- uno *scambiatore di calore* S, dove l'acqua calda pressurizzata, uscita dal reattore R, cede il proprio calore all'acqua del circuito secondario, che vaporizza;
- una *turbina* T, azionata dal vapore che si è formato nello scambiatore;
- un *condensatore* C, attraversato dal vapore a bassa pressione uscente dalla turbina;
- una *pompa* P_2 , che invia nuovamente nello scambiatore S la condensa che si è formata nel condensatore C;
- una *pompa* P_1 , che rimanda nel reattore l'acqua uscita dallo scambiatore S.

I reattori PWR sono attualmente i più diffusi.

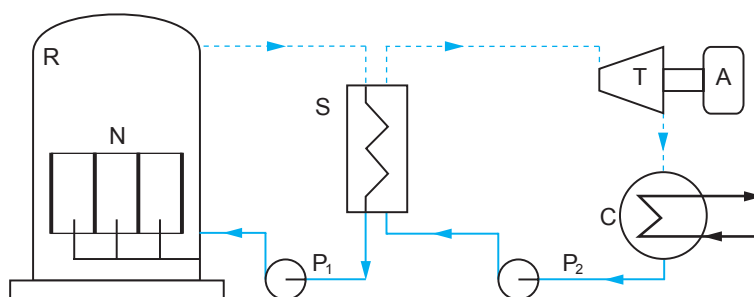


Figura 28
Schema del reattore PWR.

Confronto tra i reattori PWR e i reattori BWR

- I reattori PWR hanno un rendimento leggermente inferiore ai BWR.
- Il tipo di combustibile usato è lo stesso.
- Il controllo della reazione nucleare è simile.
- La pressione dell'acqua contenuta nel *nocciolo* (core) in entrambi i reattori è molto più elevata di quella atmosferica; nei PWR la pressione è tenuta al di sopra della tensione di vapore corrispondente alla massima temperatura dell'acqua (150 bar circa). In questo modo l'acqua non entra in ebollizione. Nei BWR, invece, la pressione del circuito primario è di circa 60 bar. Di conseguenza l'acqua comincia a bollire molto prima di completare il suo percorso all'interno del nocciolo.

Reattori veloci (o autofertilizzanti)

Oltre ai reattori BWR e PWR, come s'è detto, sono stati realizzati anche i cosiddetti reattori *veloci* (o *autofertilizzanti*) (Figura 29).



Figura 29
Reattore veloce
(o autofertilizzante).

La caratteristica principale di questi reattori è quella di produrre, oltre all'energia elettrica, il combustibile (plutonio) necessario per il loro funzionamento.

Combustibile impiegato:

- plutonio e uranio arricchito; di solito è il plutonio 239 ottenuto dallo scontro di un neutrone con un atomo di ^{238}U , più abbondante in natura dell'atomo ^{235}U .

Questa reazione non solo produce energia, ma arricchisce anche l'uranio naturale che è posizionato a questo scopo "a mantello" attorno al nocciolo. L'uranio viene trasformato in plutonio, che, come s'è detto, è il combustibile di questi reattori.

La reazione nucleare avviene mediante neutroni *veloci*. Non occorre, quindi, un fluido moderatore perché la reazione a catena è assicurata da un combustibile arricchito da isotopi fissili, cioè capaci di sviluppare una reazione a catena di fissione nucleare.

Questi reattori sono chiamati:

- *autofertilizzanti* perché il combustibile è costituito da plutonio e uranio (^{238}U) e la reazione nucleare trasforma nuovamente l'uranio in plutonio *riciclabile*;
- *veloci*, perché tutto ciò avviene senza dover diminuire la velocità dei neutroni incidenti.

Il controllo della reazione è effettuato mediante barre a forte assorbimento di neutroni.

Per il raffreddamento:

- non si usa l'acqua *leggera* (H_2O), che avrebbe anche un'azione moderatrice indesiderata;

- si usa invece il *sodio* allo stato liquido, che è dotato di un'elevata conduttività termica; può così assorbire le enormi quantità di calore presenti all'interno del reattore.

I reattori veloci sviluppano una quantità di energia termica per ogni m³ di nocciolo molto maggiore di quella di tutti gli altri tipi di reattori.

Il rendimento complessivo dell'impianto, più elevato di quello dei reattori BWR e PWR, vale circa 0,4.

I reattori autofertilizzanti rappresentano la soluzione a un eventuale esaurimento dell'uranio. Anche se producono più materiale fissile di quanto ne consumano, non sono ancora molto diffusi.

Presentano inoltre molti problemi e anche di una certa gravità che riguardano:

- l'utilizzazione del plutonio, che è un materiale fortemente tossico e cancerogeno;
- difficoltà di raffreddamento: il sodio, che è il materiale utilizzato per il raffreddamento, esplode a contatto con l'acqua;
- difficoltà di operare alle alte temperature.

3 Energia idraulica

L'*energia idraulica* è un tipo di energia rinnovabile che l'uomo ha utilizzato fin dall'antichità come fonte di energia primaria per produrre lavoro meccanico, ad esempio per l'azionamento dei mulini ad acqua (**Figura 30**).



Figura 30
Mulino ad acqua.

Attualmente per *energia idraulica* intendiamo quella forma di energia che:

- posseduta inizialmente come *energia potenziale di posizione* da una certa massa d'acqua,
- si è trasformata successivamente in *energia cinetica* ed *energia di pressione* nelle condotte d'accesso a un impianto idroelettrico,
- poi in *energia meccanica* nella rotazione dell'albero di una turbina idraulica,
- e infine in *energia elettrica* mediante un alternatore collegato direttamente all'asse della turbina. In questo caso l'energia idraulica assume il nome di *energia idroelettrica*.

L'alternatore deve ruotare con la stessa velocità di rotazione della turbina in quanto collegato direttamente ad essa. Questa, a sua volta, per poter mantenere un regime di rotazione costante, deve essere alimentata da una portata costante di fluido.

L'energia meccanica E teoricamente disponibile sull'asse della turbina è quindi l'energia potenziale gravitazionale posseduta inizialmente dalla massa m dell'acqua ($E = m \cdot g \cdot H$).

L'installazione di una centrale idroelettrica può allora avvenire soltanto dove è disponibile una quantità di acqua tale da poter alimentare l'impianto con una portata praticamente costante.

In Italia sono attualmente presenti circa 4300 centrali idroelettriche che producono il 41% dell'energia elettrica complessiva.

Vantaggi:

- l'energia idraulica è, come s'è detto, un'energia rinnovabile;
- è il sistema più economico per produrre energia elettrica: la materia prima (l'acqua) è assicurata dalle precipitazioni atmosferiche;
- i costi iniziali per la creazione delle dighe, degli impianti e delle opere di manutenzione vengono facilmente ammortizzati.

Svantaggi:

- sensibilità ai cambiamenti climatici e alla variazione delle condizioni meteorologiche;
- deturpazione dell'ambiente;
- impatto sul clima locale, sulla flora e sulla fauna.

Sono di solito impiegate due tipologie di impianti idroelettrici:

1. *ad acqua fluente*;
2. *a serbatoio*.

1. Impianti idroelettrici ad acqua fluente

Gli impianti idroelettrici *ad acqua fluente* (Figura 31) utilizzano l'acqua di un fiume o di un canale. Il salto utile, in questa tipologia di impianti, è molto ridotto. La portata d'acqua che entra nelle turbine è maggiore di quella delle centrali ad accumulazione.

2. Impianti idroelettrici a serbatoio

Gli impianti idroelettrici tradizionali *a serbatoio* (Figura 32) sono provvisti di bacini artificiali di contenimento e di regolazione situati a monte della centrale. In certi periodi dell'anno, questi bacini accumulano portate d'acqua superiori a quelle richieste dalla turbina. In questo modo possono poi alimentarla con regolarità per tutto il corso dell'anno.

Gli impianti idroelettrici tradizionali a serbatoio sono utilizzati per la produzione di grandi potenze; necessitano di invasi di grandi dimensioni e per questo hanno un forte impatto ambientale.



Figura 31
Centrale idroelettrica ad acqua fluente.



Figura 32
Impianto idroelettrico tradizionale a serbatoio a elevato salto geodetico.

Oltre agli impianti tradizionali a serbatoio, vi sono centrali idroelettriche *ad accumulazione* addossate alla diga, quindi *a basso salto geodetico*. Hanno caratte-

ristiche simili a quelle degli impianti tradizionali a serbatoio. Sono provviste di bacini artificiali di contenimento e di regolazione situati uno a monte e l'altro a valle della centrale (Figura 33).

Funzionamento: nelle ore notturne (periodi *off-peak*) si usa l'energia a basso costo, fornita dalla rete, per pompare l'acqua nel serbatoio superiore. Nelle ore diurne di maggior richiesta, cioè in presenza di picchi di domanda, l'acqua precedentemente accumulata viene rilasciata attraverso le turbine; l'energia così prodotta è venduta a prezzo più elevato.

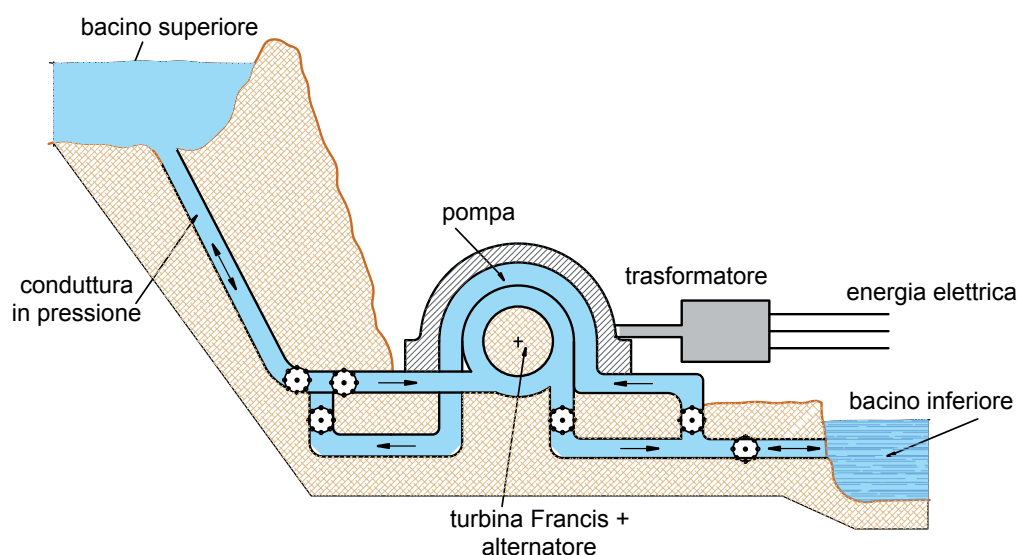


Figura 33
Schema di impianto idroelettrico a serbatoio a basso salto geodetico.

4 Energia solare

Per *energia solare* si intende l'energia proveniente dal Sole e trasmessa sotto forma di radiazione elettromagnetica.

Possiede le seguenti caratteristiche:

- è un'energia rinnovabile;
- con un'opportuna tecnologia, è possibile convertirla in energia elettrica o in energia termica;
- è ovunque disponibile, quindi non ha problemi di trasporto;
- è in quantità pressoché illimitata, dal momento che si calcola che il Sole continuerà a produrla ancora per alcuni miliardi di anni;
- non è inquinante: per ottenerla non si devono introdurre nell'ambiente sostanze nocive.

4.1 Il Sole

Il Sole è una *stella* costituita principalmente da idrogeno (circa il 92% del suo volume) ed elio (poco più del 7% del volume), cui si aggiungono altri elementi più pesanti come ossigeno, carbonio, ferro. Questa enorme massa di materia è allo stato di plasma e raggiunge la temperatura di circa 6000 °C in corrispondenza della superficie luminosa visibile; nel nucleo si è stimato che la temperatura raggiunga il valore di 1516 milioni di gradi. Dista dalla Terra circa 150 milioni di chilometri; la luce solare impiega perciò poco più di 8 minuti per raggiungere la Terra.

Rispetto alle altre stelle che compongono l'Universo, il Sole è di dimensioni medio-piccole. La sua massa è pari a 330 000 volte la massa terrestre.

I gas costituenti il nucleo sono soggetti a una pressione estremamente elevata esercitata dall'enorme massa dei gas che li sovrasta. Di conseguenza raggiungono una temperatura altrettanto elevata. La tendenza dei gas a espandersi verso l'esterno è equilibrata dalla forza di attrazione della massa gassosa verso il centro di gravità, ovvero dalla forza peso dei gas.

L'altissima temperatura presente nel Sole conferisce ai nuclei di idrogeno una grande energia cinetica che determina una reazione di fusione termonucleare: i nuclei di idrogeno, a temperature e pressioni elevate, fondono e danno origine a nuclei di elio.

In questa reazione la massa complessiva dei prodotti è inferiore a quella delle particelle interagenti; si verifica allora la produzione di un'enorme quantità di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia (equazione di Einstein).

Si calcola che l'energia emessa dal Sole ogni secondo, cioè la potenza emessa, vale circa $3,83 \times 10^{26}$ W. Questa energia si propaga nello spazio alla velocità della luce (circa 300 000 km/s) sotto forma di onde elettromagnetiche di diversa frequenza. Con frequenze in ordine crescente – e quindi lunghezza d'onda λ in ordine decrescente – troviamo le onde radio, poi le microonde, la radiazione infrarossa, la luce visibile, la radiazione ultravioletta, i raggi X e infine i raggi gamma. Nel loro insieme, esse costituiscono lo *spettro elettromagnetico* della radiazione solare.

Le radiazioni con lunghezza d'onda compresa tra 0,39 e 0,76 μm (1 micrometro = $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m) rappresentano lo *spettro del visibile*, cioè la fascia visibile per l'uomo. In particolare, le onde più corte, con λ prossimo a 0,39 μm , sono percepite come luce violetta. Seguono poi i colori indaco, blu, verde, giallo, arancione e, da ultimo, la luce rossa. Alla luce rossa corrispondono le onde più lunghe, quelle con λ prossimo a 0,76 μm .

Il Sole si comporta quindi come una centrale nucleare che, situata a notevole distanza di sicurezza, ci fornisce un'enorme quantità di energia pulita, a costo zero e praticamente inesauribile nel tempo.

Una gran parte delle radiazioni emesse dal Sole non arriva però sulla superficie terrestre perché viene assorbita o riflessa dagli strati alti dell'atmosfera che circonda la Terra (strato di ozono e di altri gas, nubi). Si tratta, in particolare, di quasi tutti i raggi γ , raggi X e raggi ultravioletti che sono le radiazioni più ricche di energia ma anche le più pericolose per gli esseri viventi. Assieme alla luce visibile raggiunge invece il suolo una piccola parte di raggi ultravioletti, infrarossi e onde radio caratterizzati da una maggiore lunghezza d'onda e da una minore pericolosità per l'uomo.

La potenza delle radiazioni solari, detta *costante solare*, è misurata al di sopra dell'atmosfera terrestre, cioè prima che venga attenuata nell'attraversamento dell'atmosfera terrestre: vale circa 1,4 kW/m². Rappresenta l'energia radiante solare che nell'unità di tempo colpisce una superficie unitaria perpendicolare alla direzione dei raggi solari. È un parametro importante nella ricerca del posizionamento ottimale dei *dispositivi di captazione* delle radiazioni solari.

Durante il passaggio attraverso l'atmosfera terrestre questa energia viene in parte riflessa verso lo spazio dalle nubi e in parte viene assorbita o dispersa in varie direzioni dai gas e dal pulviscolo presenti nell'atmosfera.

La parte di energia che infine raggiunge effettivamente la superficie terrestre è detta *radiazione solare diretta*. Ad essa si deve aggiungere la *radiazione solare diffusa* dovuta alla dispersione della radiazione diretta causata dall'atmosfera e all'emissione di raggi infrarossi da parte dell'atmosfera stessa riscaldata. Com-

più plessivamente la potenza radiante solare ricevuta sulla Terra risulta quindi minore della costante solare. Al massimo raggiunge il valore di 1 kW/m^2 . Inoltre ci sono altre variabili che possono ridurre il valore ora indicato: l'inquinamento atmosferico, la presenza di nubi, l'angolo di incidenza della radiazione rispetto alla superficie assorbente, la posizione del Sole, l'ora e il luogo della rilevazione.

L'angolo d'inclinazione ottimale di una superficie assorbente varia con la latitudine poiché la radiazione solare diventa meno intensa se ci si sposta dall'equatore verso i poli.

Si noti che alle nostre latitudini ogni metro quadrato di superficie terrestre riceve in un giorno un'energia solare di circa $12\,000 \text{ kJ}$. Durante l'inverno il Sole mantiene una posizione più bassa all'orizzonte. Le radiazioni solari diventano perciò più forti sulle superfici verticali e più deboli su quelle orizzontali; in estate si assiste al fenomeno contrario.

All'inizio e alla fine della giornata le superfici inclinate ricevono più energia radiante di quelle orizzontali, mentre nelle ore centrali del giorno si registra l'inverso, cioè un aumento dell'irraggiamento sulle superfici orizzontali rispetto a quelle inclinate.

In definitiva, l'energia solare che raggiunge la superficie terrestre ha un'intensità che varia anche notevolmente, a seconda:

- dell'altitudine e della latitudine della località;
- delle condizioni meteorologiche locali.

In uno stesso luogo, varia:

- nell'arco della giornata

e, a parità di orario:

- nell'arco dell'anno.

4.2 Usi dell'energia solare

L'energia solare può essere direttamente utilizzata nei seguenti modi:

- trasformazione dell'energia radiante in energia termica a bassa, media e alta temperatura mediante *dispositivi di captazione a fluido termovettore (pannelli o collettori solari piani)* o *sistemi a concentrazione (specchi parabolici lineari, torri solari, concentratori parabolici indipendenti)*;
- trasformazione *diretta* dell'energia solare in energia elettrica mediante le *celle fotovoltaiche*.

a) Pannelli solari termici o collettori solari piani

Per trasformare l'energia solare in energia termica a bassa temperatura ($T < 100 \text{ °C}$) si usa un dispositivo di captazione dei raggi solari detto *pannello solare termico* o *collettore solare piano* (Figura 34). Esso è costituito da una piastra tubiera P sistemata in un contenitore di metallo o di plastica e percorsa da un fluido termovettore (acqua, olio o aria). Questo fluido assorbe il calore della piastra riscaldata dalla radiazione solare incidente ed esce così dall'apparecchiatura con una temperatura maggiore di quella posseduta in ingresso.

Il collettore solare presenta le seguenti ricoperture:

1. Nella parte superiore, esposta al Sole, viene coperto con una superficie trasparente C (vetro o materiale plastico), allo scopo di:
 - limitare la dispersione di calore – per irraggiamento e per convezione – della piastra verso l'ambiente esterno;
 - proteggere la piastra dagli agenti atmosferici.

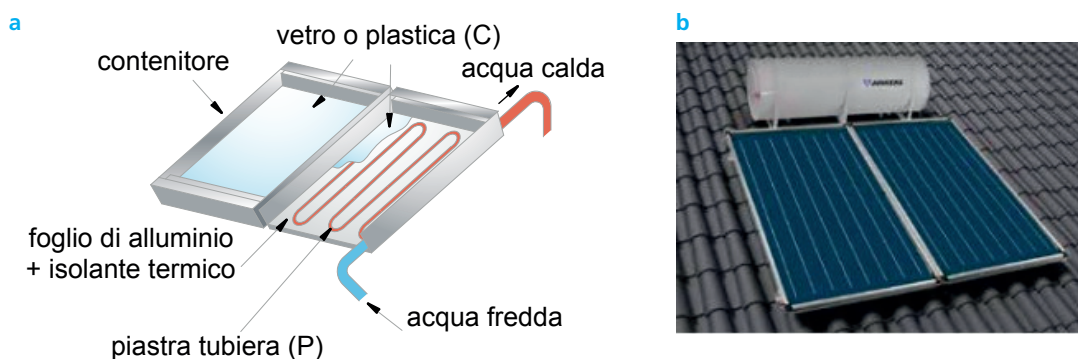


Figura 34

Pannello solare termico o collettore solare:

a schema; **b** componente commerciale.

2. Sotto la piastra assorbente viene posto uno strato di isolante termico (lana di vetro o poliuretano espanso) allo scopo di:

- ridurre le perdite di energia per conduzione verso l'ambiente esterno.

La copertura trasparente ha la funzione di:

- lasciar passare le radiazioni solari;
- riflettere le radiazioni nel campo dell'infrarosso che dalla piastra vanno verso l'esterno.

In questo modo all'interno del collettore solare si crea il cosiddetto *effetto serra*. Per *effetto serra* si intende in questo caso quel fenomeno naturale caratterizzato da un continuo aumento della temperatura di un ambiente dovuto:

- al continuo afflusso di energia apportato in quell'ambiente dall'irraggiamento solare;
- al contemporaneo impedimento della dispersione del calore.

Il nome *effetto serra* deriva dall'analogia con ciò che accade all'interno di una serra per la coltivazione, dove l'aumento della temperatura è dovuto al fatto che i vetri permettono ai raggi del Sole di entrare ma non consentono loro di uscire sotto forma di raggi infrarossi.

In **Figura 35** è rappresentato lo schema di un impianto di produzione di acqua calda con collettori solari piani. L'impianto è costituito da:

- uno o più *pannelli C* in cui la radiazione solare riscalda il *fluido termovettore*, così chiamato perché adatto a immagazzinare e trasportare calore;

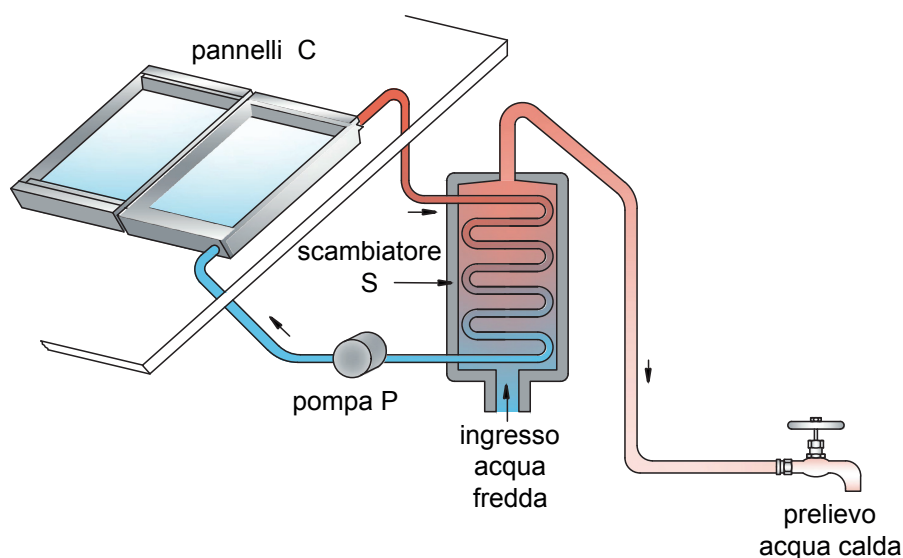


Figura 35

Impianto di produzione di acqua calda.

- uno *scambiatore S* al quale arriva il fluido proveniente dai pannelli dopo aver percorso una *rete tubiera*; nello scambiatore l'energia termica accumulata viene ceduta al fluido che circola all'interno dell'impianto di utilizzazione;
- una *pompa P* nella quale entra il fluido freddo in uscita dallo scambiatore *S*. La pompa invia il fluido di nuovo nel pannello solare e assicura così la circolazione del fluido nell'impianto.

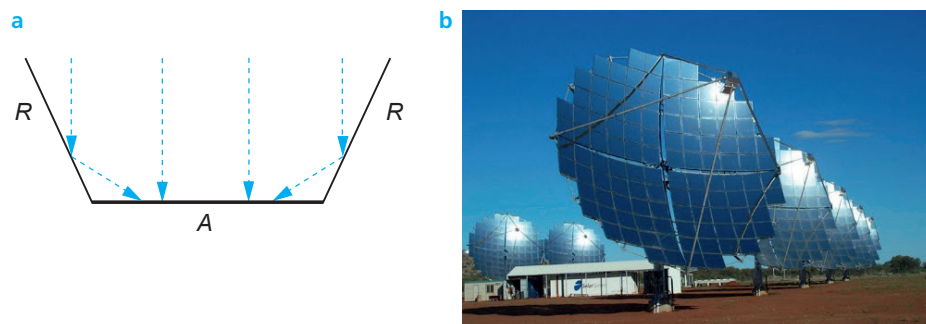
Mediante i pannelli solari si ottiene acqua calda per uso domestico a temperatura inferiore a 100 °C; l'acqua può anche essere utilizzata per il riscaldamento di edifici, serre, piscine e per usi agricoli e industriali.

Collettori solari a concentrazione

Applicazioni più avanzate basate sul solare termico concentrano grandi quantità di luce solare su un'area di dimensioni ridotte per produrre calore ad alta temperatura, trasformato poi in elettricità mediante un normale generatore termoelettrico.

Per trasformare l'energia solare in energia termica *ad alta temperatura* (assai maggiore di 100 °C) si utilizzano più superfici riflettenti piane *R* che concentrano i raggi solari sulla superficie assorbente piana *A* (**Figura 36a**). Si tratta della più semplice soluzione costruttiva, detta *sistema a specchi*, per la realizzazione di *collettori solari a concentrazione*: una o più superfici riflettenti concentrano la radiazione solare incidente su una piastra assorbente rivolta verso sud.

Figura 36
Collettori solari a concentrazione: **a** schema; **b** impianto in opera.



Questo tipo di collettore a concentrazione non prevede alcun dispositivo per inseguire i raggi solari; è caratterizzato da bassi valori ($2 \div 4$) del *rapporto di concentrazione* C_r , definito come rapporto tra l'area efficace della superficie riflettente e l'area della superficie assorbente. I collettori a basso valore di C_r sono indicati per il riscaldamento degli ambienti o dell'acqua a uso igienico-sanitario dove la temperatura del fluido termovettore è minore di 100 °C.

All'aumentare di questa temperatura occorrono rapporti di concentrazione sempre maggiori. È il caso, ad esempio, delle centrali elettriche con turbine a vapore dove sono richieste temperature del fluido termovettore assai maggiori di 200 °C.

Una delle più sfruttate soluzioni costruttive di collettori a concentrazione è rappresentata dai collettori con superficie riflettente cilindrica a sezione parabolica, detti *specchi parabolici lineari*.

Gli elementi di cui sono composti sono essenzialmente:

- una *superficie riflettente* curva di forma parabolica;
- un lungo *tubo assorbitore* percorso dal fluido da riscaldare.

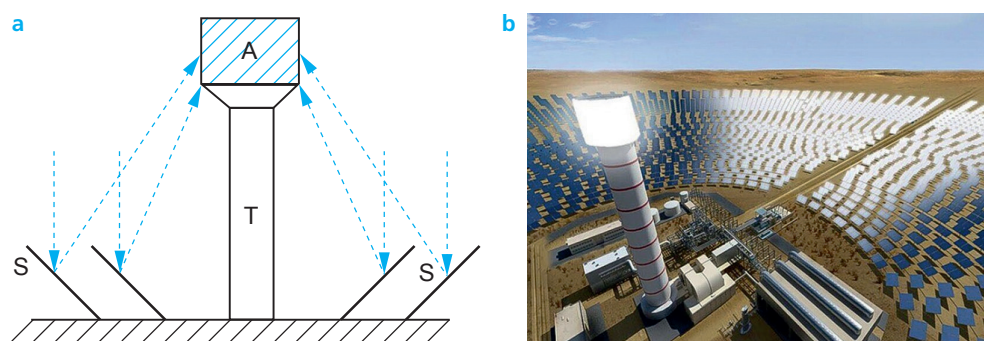
La superficie riflettente focalizza i raggi solari sul tubo assorbitore che è posizionato lungo la linea focale del collettore. Il fluido da riscaldare che percorre il tubo può essere acqua o glicole.

Con questo tipo di collettore si raggiungono temperature che superano anche il valore di $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il calore solare vaporizza il fluido; esso successivamente viene impiegato per il funzionamento di un turbogeneratore elettrico. Questi collettori sono meno costosi di quelli piani ma, dovendo essere sempre puntati verso il Sole, necessitano di un dispositivo meccanico di inseguimento dei raggi solari.

Un altro tipo di collettore a concentrazione è la *torre solare* (Figure 37a, b). Essa è costituita da:

- un sistema di *specchi S* che riflettono i raggi solari;
- un *assorbitore A* nel quale vengono concentrati i raggi solari provenienti dagli specchi;
- una *torre di sostegno T* in cima alla quale è posto l'assorbitore;
- un *fluido* (ad esempio: un sale fuso, un nitrato), contenuto nell'assorbitore, che svolge la funzione di accumulare energia termica. Raggiunge temperature anche rilevanti per effetto della notevole quantità di calore solare accumulato.

Figura 37
Torre solare: **a** schema;
b installazione.



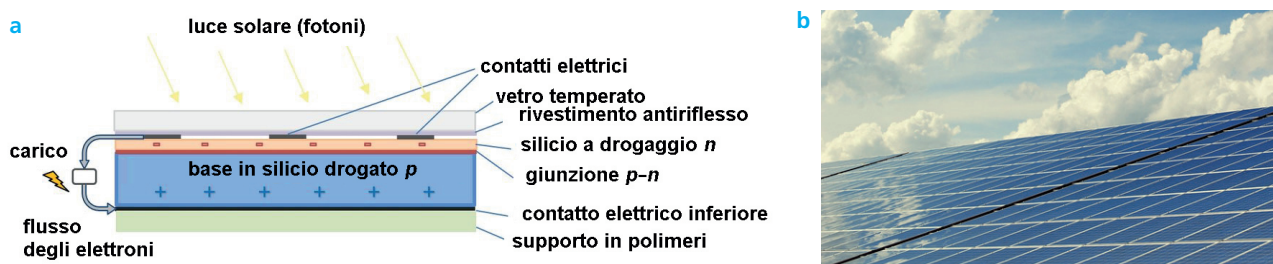
Il calore così accumulato nel sale fuso consente di ottenere vapore ad alta temperatura (oltre $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) e di far funzionare un gruppo turbogeneratore elettrico che produce energia elettrica anche nelle ore di assenza della luce solare.

Nelle torri solari ogni specchio piano, detto *eliostato*, deve seguire perfettamente il moto del Sole. Per questo motivo può muoversi attorno a due assi di rotazione ortogonali tra loro, in modo da poter seguire non solo il percorso del Sole durante il giorno ma anche le variazioni della sua inclinazione nel corso dell'anno.

b) Celle fotovoltaiche

La *conversione diretta* dell'energia solare in energia elettrica, senza passare attraverso altre forme di energia, viene ottenuta negli impianti che utilizzano le *celle fotovoltaiche* (Figure 38a, b): in particolare quelle al silicio cristallino che trasformano direttamente l'energia elettromagnetica solare, cioè l'irraggiamento solare, in energia elettrica.

Figura 38
Pannello solare: **a** struttura
di una cella; **b** installazione
di pannelli.



Ogni cella è costituita da un diodo a cristallo di forma piatta e molto sottile.

Il silicio è un semiconduttore che può essere definito di tipo p o di tipo n quando, con un'opportuna diffusione controllata (*drogaggio*), viene introdotto nel reticolo come impurezza rispettivamente un elemento del 3° gruppo (ad esempio, boro) o del 5° gruppo (ad esempio, fosforo).

In un semiconduttore di tipo p gli elettroni risultano in difetto rispetto alle cariche positive, mentre in un semiconduttore di tipo n risultano in eccesso.

Le zone con assenza di elettroni sono chiamate *lacune* (o *vacanze*, *buchi*, *hole*).

Un elemento tipo p tende perciò ad attirare elettroni; un elemento tipo n tende invece a perderli.

Se si unisce allora un semiconduttore di tipo p con uno di tipo n si ottiene una *giunzione $p-n$* . Nella zona di contatto tra i due strati, a causa della diversa densità di cariche elettriche libere, si crea un campo elettrico.

Quando un fotone di luce solare viene assorbito dalla cella, cede la propria energia al cristallo, rompe un legame elettronico e crea una coppia elettrone-lacuna.

La presenza del campo elettrico della giunzione $p-n$ muove gli elettroni liberati verso n e le lacune verso p e separa così le cariche di segno opposto della coppia.

Queste vengono raccolte mediante appositi elettrodi per impedirne la ricombinazione e favorire perciò la loro effettiva partecipazione alla conduzione elettrica.

Se la giunzione $p-n$ è elettricamente collegata con un carico esterno, esso viene attraversato da una corrente elettrica la cui intensità sarà proporzionale al numero delle coppie elettrone-lacuna generate dalla luce solare e poi raccolte.

In definitiva il principio di funzionamento di una *cella fotovoltaica* (o *cella solare*) si basa sull'*effetto fotovoltaico*, caratterizzato dalla formazione di una differenza di potenziale stabilita tra le due estremità di una giunzione $p-n$ esposta alla radiazione solare e capace di generare una corrente elettrica.

I sistemi fotovoltaici hanno i seguenti *vantaggi*: pulizia ecologica, energia alimentatrice inesauribile, assenza di manutenzione per la mancanza di parti meccaniche in movimento, installazione facile e veloce.

Il *costo* delle celle fotovoltaiche era inizialmente elevato, a causa degli alti costi degli impianti di produzione delle celle e della conseguente scarsa richiesta del prodotto sul mercato. Tuttavia il costo del kWh prodotto è in diminuzione e sta diventando competitivo con le altre tecniche di produzione di elettricità.

Il *rendimento pratico* di una cella fotovoltaica, ossia la frazione di energia luminosa trasformata in energia elettrica, raggiunge ora il valore del 18% circa, mentre la tensione di uscita di ogni cella è di circa 0,5 volt. Per ottenere una certa intensità di corrente si possono collegare *in parallelo* più fotocellule. Invece, per avere una tensione elettrica maggiore, le celle, generalmente di forma circolare, vengono collegate *in serie* e racchiuse in una custodia trasparente che serve da protezione e supporto.

Il blocco così ottenuto è di solito costituito da 36 celle al silicio mono- e policristallino e viene detto *modulo* (o *pannello*) *fotovoltaico*. I suoi dati tecnici più significativi sono: la potenza nominale di 50 ÷ 80 W, la tensione di lavoro (continua) di circa 17 V e la superficie di circa 0,5 m²; si tenga tuttavia conto che questi parametri sono in continua evoluzione.

Il modulo è l'elemento base per la costruzione del generatore negli impianti fotovoltaici che producono energia elettrica. Un generatore fotovoltaico è infatti costituito da un certo numero di moduli collegati tra di loro per ottenere una determinata potenza a una fissata tensione di lavoro.

In un impianto fotovoltaico collegato alla rete l'energia elettrica in tensione continua prodotta dal generatore è convertita in alternata e immessa in rete. Invece in un impianto isolato l'energia viene accumulata in normali batterie per essere poi utilizzata in caso di illuminazione assente o insufficiente.

5 Energia eolica

L'*energia eolica*, o energia del vento, è un tipo di energia non solo rinnovabile, ma anche ecologica, che l'uomo ha utilizzato fin dall'antichità per il funzionamento di mulini a vento e di apparecchiature adibite al sollevamento dell'acqua (Figura 39).



Figura 39
Mulini a vento in Olanda.



Figura 40
Pompa eolica per irrigazione.

Attualmente l'energia eolica viene usata anche in altre applicazioni agricole e industriali quali, ad esempio, pompe eoliche per irrigazione (Figura 40), azionamento di impianti artigianali e produzione di energia elettrica mediante gruppi di aeromotori collegati alla rete elettrica.

Con il termine *aeromotore* (o *aerogeneratore*, Figura 41) viene indicata la macchina eolica azionante un generatore elettrico.

L'energia del vento è dovuta ai moti convettivi dell'aria che si creano nell'atmosfera a causa del riscaldamento generato dalla radiazione solare.

Per sfruttare al meglio l'energia eolica ed evitare un funzionamento intermittente della macchina eolica, occorre che il vento abbia le seguenti caratteristiche:

- intensità elevata e costante nel tempo;
- velocità costante e senza mutamenti di direzione.

L'intensità del vento (brezza, vento moderato, vento forte ecc.) viene misurata dalla sua velocità, che è espressa in m/s, km/h o nodi (1 nodo, simbolo kn, equivale a 1,852 km/h), e viene rilevata tramite uno strumento chiamato *anemometro* (Figura 42).



Figura 41
Aerogeneratori.



Figura 42
Anemometro.

Le condizioni di vento che presentano caratteristiche favorevoli all'utilizzo di aeromotori si verificano normalmente in diversi Paesi europei: Olanda, Svezia, Germania, Danimarca ecc. In particolare, negli ultimi anni del secolo scorso, in Germania e Danimarca si è registrata una crescita esponenziale della potenza degli impianti eolici connessi a rete e la copertura con l'eolico di una notevole quota percentuale del fabbisogno elettrico di quelle Nazioni.

A livello mondiale in circa 15 anni, a partire dal 1981, sono stati installati impianti eolici connessi a rete per una potenza stimata di oltre 6000 MW, di cui circa 3400 MW in Europa.

Il vento è quindi una fonte importante di energia. Oggigiorno l'energia eolica è l'energia rinnovabile meno costosa; il suo costo è dovuto principalmente all'investimento iniziale. A differenza dell'energia idraulica, quella eolica è un'energia non accumulabile.

Potenza teorica fornita dal vento

La potenza teorica P_t che può essere fornita dal vento è esprimibile con la seguente relazione:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

dove ρ è la densità (o massa volumica) dell'aria che si muove con velocità v attraverso una superficie di area A posta perpendicolarmente alla direzione del vento.

Se si esprime ρ in kg/m^3 , A in m^2 e v in m/s , la potenza P_t risulta espressa in watt.

Potenza teorica fornita dagli aerogeneratori

La potenza teorica ottenibile dal vento tramite un aerogeneratore ad asse orizzontale dipende dall'area $A = \pi \cdot R^2$ spazzata dalle pale del rotore eolico.

Questa potenza cresce:

1. all'aumentare del raggio R delle pale;
2. con l'aumentare della velocità del vento.

Osservazioni

- Gli attuali aerogeneratori hanno pale che raggiungono lunghezze di varie decine di metri (80 ÷ 85 m); macchine eoliche di dimensioni maggiori possono produrre più energia elettrica ma, alla fine, i maggiori costi strutturali possono superare i vantaggi economici.
- Teoricamente, se la velocità del vento raggiunge valori molto alti, un aerogeneratore potrebbe produrre potenze elevatissime. In pratica, però, se la velocità del vento supera un certo valore limite (20 ÷ 25 m/s , *cut-out wind speed*), possono nascere sollecitazioni pericolose per la resistenza delle parti componenti la struttura. Per evitare ciò è necessario che l'aeromotore sia dotato di un sistema frenante.

La *potenza massima teorica* P_o ottenibile dal vento è tuttavia notevolmente minore di quella teorica calcolata e per un aerogeneratore ad asse orizzontale (tipo più diffuso) e con pale rotanti in piani perpendicolari al suolo risulta: $P_o \approx 0,6 \cdot P_t$. Se si tiene conto anche del rendimento dell'intero meccanismo, normalmente le macchine eoliche attuali consentono la produzione di energia elettrica con un rendimento pari a circa 0,4 ÷ 0,5.

Classificazione degli aerogeneratori

Gli *aerogeneratori* possono essere: ad asse orizzontale o ad asse verticale.

a) Aerogeneratori ad asse orizzontale

Un *aerogeneratore ad asse orizzontale* è costituito dai seguenti elementi (**Figura 43**):

- una *torre di sostegno* (a traliccio o conica) sulla quale è posizionato il rotore;
- un *rotore* (o *girante a elica*) formato da:
 - un *mozzo*;
 - una *palettatura*. Le *pale* della macchina sono fissate al mozzo; l'altezza da terra del mozzo può arrivare fino a $120 \div 130$ m;
- un *generatore elettrico*, collegato al rotore;
- una cabina (*navicella*) nella quale è alloggiato il generatore elettrico assieme ai meccanismi di trasmissione del moto e di controllo del funzionamento generale della macchina (sistema frenante; rotismo moltiplicatore di giri). La navicella è fissata in modo tale da essere facilmente orientabile a seconda della direzione del vento.

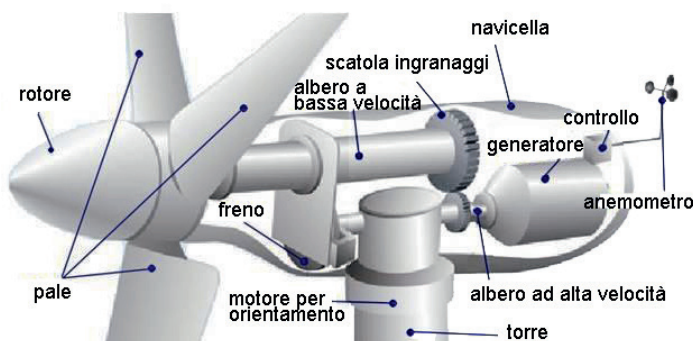


Figura 43

Schema di un aerogeneratore ad asse orizzontale.

Le pale degli aerogeneratori ad asse orizzontale hanno una forma aerodinamica a profilo alare. Generalmente sono in numero di tre, ma esistono in commercio anche rotori con una o due pale.

Gli aerogeneratori ad asse orizzontale sono impiegati per il medio e grande eolico, ovvero per potenze superiori a 200 kW.

a



b) Aerogeneratori ad asse verticale

Gli *aerogeneratori ad asse verticale* (**Figura 44**) trovano impiego soprattutto nelle zone caratterizzate da venti deboli e soggetti a forte variabilità. Vengono usati nel minieolico (da 20 kW a 200 kW) e nel microeolico (fino a 20 kW).

Rispetto ai generatori ad asse orizzontale presentano i seguenti vantaggi:

- funzionamento costante, indipendente dalla direzione del vento;
- funzionamento già con un vento di piccola intensità;
- alta resistenza anche ai venti con elevata velocità e turbolenza;
- piccolo ingombro;
- maggiore silenziosità.

Gli svantaggi sono:

- minore efficienza nella conversione dell'energia eolica in energia elettrica;
- non possono sfruttare i venti più forti che soffiano a elevate altezze dal suolo, in quanto non sono montati su torri;
- prezzo al kW più alto.

b



Figura 44

Aerogeneratori ad asse verticale.

6 Energia geotermica

L'energia geotermica sfrutta il flusso termico che proviene dall'interno della Terra; in superficie, si manifesta principalmente:

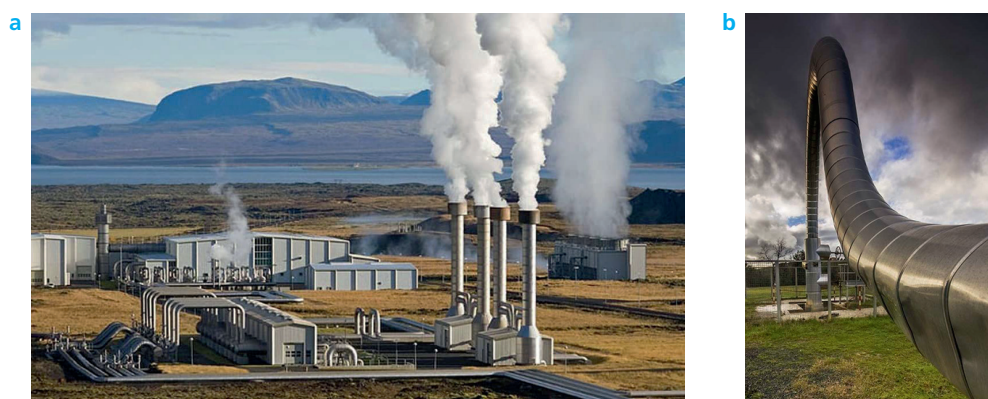
- nei *geyser*, potenti getti d'acqua bollente e vapore che scaturiscono dal sottosuolo periodicamente da sorgenti termali;
- nelle sorgenti di acqua calda alla temperatura di circa $70 \div 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- nei fenomeni vulcanici e magmatici;
- nei getti di vapore (soffioni boraciferi).

La temperatura, man mano che si penetra nel sottosuolo, cresce con gradualità; mediamente aumenta di circa $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni 100 metri di profondità (*gradiente geotermico*). In alcune zone, a causa di particolari condizioni geologiche, il gradiente geotermico è molto più elevato, tanto da avere temperature di $250 \div 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a profondità comprese tra i 2000 e i 4000 metri.

I pozzi più profondi per lo sfruttamento dell'energia geotermica penetrano fino a circa 9000 metri di profondità. In genere, quando l'energia termica richiesta serve per il riscaldamento di singoli edifici, i pozzi geotermici hanno profondità variabili da 50 a 150 metri, a seconda delle condizioni del sottosuolo (Figura 45a, b).

Figura 45

a Impianto geotermico;
b tubatura (pipeline) di
impianto geotermico.



In alcune centrali geotermiche, come ad esempio nella centrale di Larderello, in Toscana, si utilizza il vapore uscente dal sottosuolo per produrre energia elettrica. In quella centrale sono stati perforati numerosi pozzi a profondità variabile tra 500 e 1200 metri.

In questa località, fin dai primi anni del secolo scorso è stato realizzato un impianto industriale per lo sfruttamento dell'energia geotermica dei cosiddetti *soffioni boraciferi*, il cui vapore è particolarmente ricco di acido borico, utilizzato nell'industria chimica. I *soffioni* sono violente emissioni dal sottosuolo di vapore acqueo ad alta pressione e temperatura.

Dai pozzi del campo geotermico di Larderello attualmente si estrae vapore surriscaldato a una temperatura massima di circa $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con una pressione massima di circa 1 MPa. Questo vapore è utilizzato per la produzione di circa 3 miliardi di kWh annui di energia elettrica.

In Italia esistono altre centrali geotermiche; complessivamente la produzione italiana di energia geotermoelettrica raggiunge una quota consistente (circa il 30%) nell'ambito della produzione mondiale. L'energia geotermica è disponibile in molte regioni della Terra.

Gli impianti per lo sfruttamento dell'energia geotermica presentano le seguenti caratteristiche:

Vantaggi:

- sono facilmente realizzabili;
- sono dotati di grande flessibilità;
- possono essere facilmente potenziati a seconda delle varie esigenze.

Svantaggi:

- l'energia geotermica deve essere necessariamente utilizzata sul posto di estrazione;
- non vi è la possibilità di accumularla per utilizzarla nei momenti desiderati. Infatti l'acqua calda proveniente da un pozzo ha una temperatura non elevata ($70 \div 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e quindi non è possibile un trasporto a distanza a causa delle inevitabili dispersioni termiche.

I criteri seguiti per la realizzazione degli impianti che sfruttano l'energia geotermica sono i seguenti:

1. In un tipo di impianto (**Figura 46a**) il vapore dei soffioni S subisce direttamente un'espansione nella turbina T collegata al generatore elettrico G, per essere poi scaricato in atmosfera o inviato agli impianti chimici al fine di ottenere acido borico concentrato. In questo impianto il consumo specifico di vapore è piuttosto elevato (circa 20 kg/kWh).

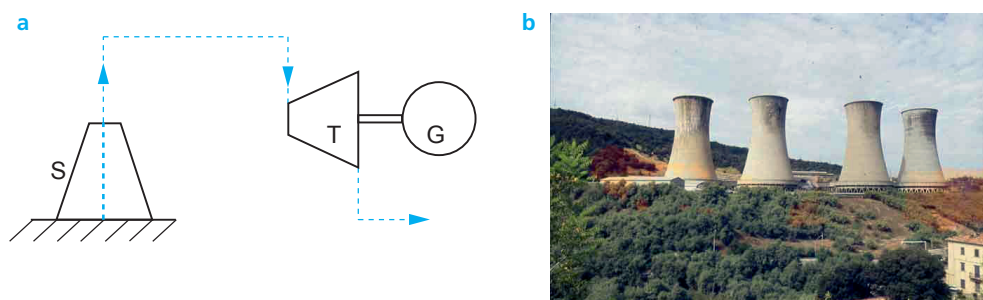
2. Un secondo tipo di impianto, simile al precedente, prevede ancora l'alimentazione della turbina direttamente con vapore naturale. A differenza del precedente impianto, in questo è presente un condensatore nel quale entra il vapore uscente dalla turbina. Il condensatore è collegato, per la refrigerazione, a una *torre di raffreddamento* ad aria (**Figura 46b**).

Il consumo specifico di vapore di questo tipo di impianto (circa 10 kg/kWh) è la metà di quello dell'impianto precedente.

3. Esiste infine un terzo tipo di impianto in cui il vapore naturale proveniente dal soffione cede il proprio calore di vaporizzazione in uno scambiatore intermedio; la turbina viene alimentata dal vapore uscente da questo scambiatore. Anche in questo impianto, a valle della turbina è presente un condensatore refrigerato mediante una torre di raffreddamento ad aria. In questo impianto lo sfruttamento dell'energia geotermica avviene quindi in maniera *indiretta*; il consumo specifico di vapore è di circa 15 kg/kWh .

Figura 46

a Schema di impianto geotermico; **b** torri di raffreddamento ad aria.



7 Energia da biomasse

Nel corso dei processi industriali dei settori agroalimentare, zootecnico e forestale avvengono trasformazioni di prodotti sia animali sia vegetali. Tali trasformazioni generano materiali di scarto. La *biomassa* è costituita dalle sostanze organiche contenute in questi materiali di scarto.

Utilizzazione delle biomasse

Le biomasse possono:

- essere utilizzate direttamente come combustibili e come tali generare calore (per il riscaldamento di abitazioni, edifici pubblici ecc.) ed energia elettrica;
- essere trasformate in combustibili solidi, liquidi o gassosi (*biocombustibili*) mediante opportune tecnologie di conversione.

Le biomasse vengono convertite in energia in apposite centrali a biomassa, dove sono bruciate in una camera di combustione; il calore prodotto è utilizzato per generare energia elettrica o per il riscaldamento degli edifici a uso civile e industriale.

La biomassa è una fonte di energia pulita e flessibile che valorizza gli scarti e i sottoprodotti. È considerata una delle principali future risorse di energia rinnovabile, tale da poter garantire l'autonomia energetica, perché:

- può essere utilizzata in molti settori (dal settore termico a quello elettrico ecc.);
- è conveniente dal punto di vista economico;
- offre numerosi vantaggi anche dal punto di vista sociale e ambientale.

La richiesta di energia da biomasse è in costante crescita. A livello mondiale essa costituisce il 15% del fabbisogno energetico totale; nei Paesi in via di sviluppo rappresenta dal 40 al 90%, nei Paesi industrializzati appena il 3%. In alcuni Paesi nordeuropei raggiunge il 20%.

Tra le molteplici tecnologie di conversione cui viene sottoposta la biomassa citiamo le seguenti:

1. la *fermentazione aerobica (digestione aerobica)*, cioè in presenza di ossigeno: serve per produrre alcool che, miscelato alla benzina, è usato nell'auto-trazione;
2. la *fermentazione batterica anaerobica (digestione anaerobica)*, cioè in assenza di ossigeno: serve per produrre *biogas* dai rifiuti organici vegetali e animali. Il biogas può a sua volta essere utilizzato:
 - per generare calore o elettricità,
 - oppure, dopo un processo di purificazione a *biometano*:
 - come combustibile per autoveicoli,
 - o immesso nella rete di distribuzione del metano;
3. la *gassificazione*: serve per ricavare un gas (*gas di gasogeno*) che ha un potere calorifico inferiore abbastanza basso; viene impiegato ad esempio per l'alimentazione delle turbine a gas.

Come fonti di biomassa possono essere utilizzati:

- i rifiuti solidi urbani (RSU);
- i residui industriali, tra i quali:
 - i materiali di scarto delle aziende alimentari e di quelle zootecniche;
- i residui della produzione agricola (paglia di cereali);
- i residui forestali, come ad esempio:
 - la legna da ardere;
 - il *cippato* (legno in scaglie);
 - gli scarti di segherie e di falegnamerie ecc.;

- le culture arboree e di canna da zucchero destinate a essere convertite in energia. In particolare:
 - dalle piante ad alto contenuto di zucchero o di amido viene estratto il *bioetanolo*. Tra queste, la canna da zucchero è la maggior fonte mondiale di *etanolo* ottenuto per fermentazione (Figura 47).

Figura 47

Piantagione di canna da zucchero.



Lo sfruttamento delle fonti di biomassa offre i seguenti vantaggi:

- riduzione dell'inquinamento: vengono eliminati rifiuti domestici, industriali e agricoli spesso inquinanti per l'ambiente;
- i combustibili ottenuti dalla biomassa:
 - producono meno zolfo e ossido di azoto rispetto ai combustibili fossili;
 - contribuiscono in misura ridotta all'effetto serra poiché la quantità di CO₂ emessa dipende solo dalla quantità di carbonio assorbito durante la loro formazione.

8 Energia dal mare (energia mareomotrice)

L'*energia mareomotrice* è una fonte energetica alternativa e rinnovabile che si può ricavare dal mare, o meglio: dallo spostamento di ingenti masse d'acqua dovuto alle maree o al moto ondoso dell'acqua del mare.

Le maree sono provocate dall'azione gravitazionale della Luna e del Sole. In certe regioni il dislivello tra l'alta e la bassa marea, che normalmente non supera il metro, raggiunge valori elevati (10 ÷ 15 metri). Sono queste le zone nelle quali è possibile sfruttare al meglio l'energia mareomotrice per produrre energia elettrica.

Gli impianti che attualmente utilizzano energia dal mare sono generalmente costituiti da:

- un grande *bacino*;
- uno *sbarramento* artificiale che racchiude il bacino;
- un certo numero di *paratie* di cui è munito lo sbarramento; le paratie servono per riempire e vuotare velocemente il bacino;
- *turbine reversibili*, cioè che funzionano sia che il flusso abbia un verso sia che abbia il verso opposto;
- *tunnel*, entro i quali sono poste le turbine; la massa d'acqua percorre i tunnel in un senso, durante l'alta marea, in senso opposto, durante la bassa marea.

Il funzionamento di un impianto che sfrutta le maree avviene in base al seguente schema:

1. si fa affluire l'acqua nel bacino durante l'alta marea per poi lasciarla defluire nel corso della bassa marea;

2. durante l'alta marea, la massa d'acqua, per affluire nel bacino, percorre i tunnel, acquista velocità e mette in funzione le turbine collegate ai generatori;
3. quando l'onda della marea ha raggiunto la sua altezza massima, le paratie si chiudono;
4. durante la bassa marea le paratie si riaprono; l'acqua del bacino defluisce verso il mare aperto, percorre i tunnel in senso opposto e mette nuovamente in funzione le turbine.

Queste centrali possono essere collocate solo sull'estuario di quei fiumi dove l'altezza di marea raggiunge valori elevati. Questi luoghi devono cioè offrire le migliori condizioni per una proficua utilizzazione del movimento delle masse d'acqua.

Una grande centrale elettrica di questo tipo si trova sull'estuario del fiume La Rance, nel golfo di Saint-Malo (Francia) (**Figura 48**). Funzionante dal 1966, sfrutta un dislivello di 13,5 m per azionare turbine Kaplan. La potenza sviluppata è pari a 240 MW.

Figura 48

Centrale elettrica a maree
(La Rance, Francia).



I principali ostacoli allo sviluppo di questa fonte energetica sono:

- elevati costi di installazione della centrale;
- eventuali problemi di carattere ambientale, dovuti agli effetti prodotti sull'ecosistema locale e, in particolare, sulla fauna ittica;
- discontinuità nella produzione di energia;
- progressivo accumulo di sedimenti sul fondo del bacino.

Tra gli impianti che sfruttano le correnti di marea occorre citare anche quello di Strangford Lough.

Nel 2007 a Strangford Lough, nell'Irlanda del Nord, è stata installata una centrale mareomotrice della potenza di 1,2 MW che sfrutta le correnti di marea che percorrono il fiordo (**Figura 49**). Il suo funzionamento è simile a quello di un mulino sottomarino. I due rotori sono spinti da una corrente marina molto veloce (fino a 4 m/s). È previsto che l'impianto si fermi quando la velocità della corrente si riduce eccessivamente o quando cambia la marea.

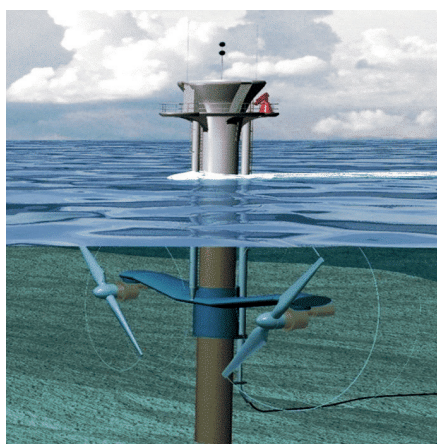


Figura 49

Centrale mareomotrice
(Strangford Lough, Irlanda
del Nord).

8.1 Altre forme di energia ricavabili dal mare

Esistono altre forme di energia ricavabili dal mare. Tra queste ricordiamo:

- l'energia a gradiente termico (o talassotermica – dal greco *thalassa*, “mare”);
- l'energia a gradiente salino (o osmotica);
- l'energia che sfrutta il moto ondoso del mare.

a) Energia a gradiente termico (o talassotermica)

Le centrali *a gradiente termico* sfruttano la differenza di temperatura tra l'acqua (calda) della superficie del mare e l'acqua (fredda) del fondale. I mari tropicali sono i più adatti per questo tipo di tecnologia.

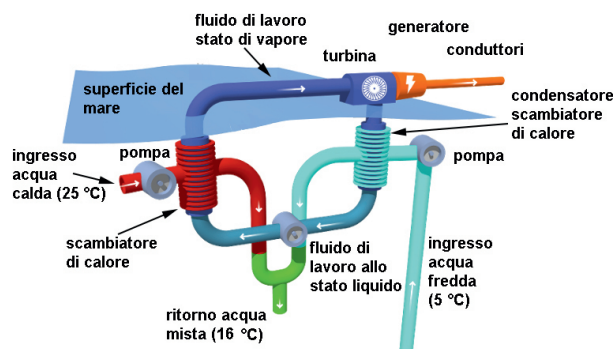
Funzionamento (Figura 50):

1. un liquido (ammoniaca e cloro) vaporizza alla temperatura dell'acqua di superficie;
2. il vapore in pressione aziona una turbina collegata a un alternatore;
3. il vapore attraversa poi un condensatore raffreddato dall'acqua (fredda) aspirata dal fondale marino e condensa;
4. la condensa torna in circolazione e ricomincia il ciclo.

Centrali a gradiente termico sono state installate a Tahiti e a Bali, ma sono ancora in fase sperimentale.

Figura 50

Schema del funzionamento di una centrale a *gradiente termico* (OTEC).



b) Energia a gradiente salino (o osmotica)

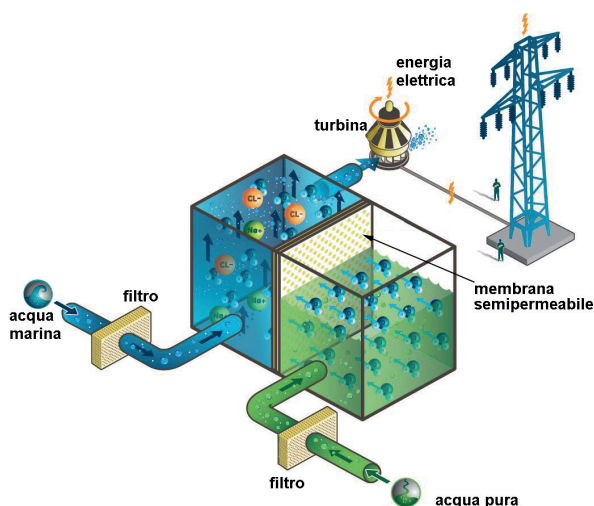
Le centrali *a gradiente salino* sfruttano la differenza di salinità tra l'acqua *dolce* alla foce di un fiume e l'acqua più salata del mare.

Funzionamento (Figura 51):

1. una parete semipermeabile separa due contenitori, uno d'acqua dolce, l'altro d'acqua salata;

Figura 51

Schema di generatore funzionante a osmosi per differenza di salinità. La differenza tra il livello dell'acqua marina e quello dell'acqua pura è dovuta alla pressione osmotica.



2. le molecole di acqua presenti nell'acqua dolce si trasferiscono naturalmente nell'acqua salata attraverso la membrana di separazione;
3. il sale invece, che ha molecole più grandi di quelle dell'acqua, non può attraversare la membrana nel senso inverso;
4. la pressione (pressione *osmotica*) prodotta dall'acqua che ha attraversato la membrana è utilizzata da una turbina per generare energia.

In Olanda esistono centrali, ancora in fase sperimentale, che sfruttano l'energia a gradiente salino.

c) Energia che sfrutta il moto ondoso del mare

Le centrali *a onde* sono costituite da apparecchiature cilindriche, lunghe circa cento metri ciascuna, ancorate al fondale in modo da permettere il rollio e il beccheggio. Si comportano come se fossero enormi serpenti marini.

I generatori di energia elettrica sono messi in funzione dal movimento delle onde.

La prima centrale a onde nel mondo è stata impiantata nel 2008 al largo delle coste di Aguçadoura (Portogallo) (**Figura 52**). Altre installazioni di questo tipo sono previste in Norvegia, Spagna, Francia, Sudafrica e Stati Uniti.



Figura 52

Centrale a onde al largo delle coste di Aguçadoura (Portogallo).

9 Energia da idrogeno

L'*idrogeno* è l'elemento chimico più abbondante nell'Universo. È un gas inodore, incolore e insapore, facilmente infiammabile. Allo stato combinato lo si trova, ad esempio, nell'acqua o nei composti organici. Come combustibile è utilizzato nelle reazioni di fusione nucleare e nelle *celle a combustibile*; industrialmente, l'idrogeno viene impiegato nella produzione dell'ammoniaca e nell'idrogenazione degli oli vegetali (margarina).

Viene ricavato dall'acqua mediante scissione elettrolitica; dai materiali organici, come i combustibili fossili e le biomasse, mediante reazioni chimiche.

Celle a combustibile

L'impiego energetico dell'idrogeno si realizza nelle *celle a combustibile* (*fuel cell*) che rappresentano una tecnologia innovativa in fase di avanzata sperimentazione industriale per la produzione di energia elettrica.

Le celle a combustibile sono dispositivi nei quali l'energia chimica del combustibile (idrogeno) è trasformata direttamente in energia elettrica senza utilizzare i tradizionali cicli termodinamici delle centrali termoelettriche.

In una *fuel cell* si realizza un processo termochimico attraverso il quale l'idrogeno viene combinato con l'ossigeno. Alla fine di questo processo si ha formazione di acqua e produzione di calore. Il calore viene recuperato e inviato all'e-

sterno, in modo da mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.

Il funzionamento di una cella a combustibile è analogo a quello di una batteria: entrambe infatti producono energia elettrica attraverso un processo termochimico. A differenza della batteria, la cella a combustibile funziona ininterrottamente finché le viene fornito il combustibile (idrogeno) e il comburente (ossigeno dell'aria).

Una cella a combustibile a idrogeno-ossigeno è costituita da:

- due *elettrodi* (*anodo* e *catodo*), che devono essere:
 - porosi, per permettere una rapida diffusione dei reagenti nell'elettrolita;
 - buoni conduttori elettrici;
- dei *catalizzatori* (di platino o di palladio), per favorire il processo di ossidazione dell'idrogeno e quello di riduzione dell'ossigeno;
- una *soluzione elettrolitica*, generalmente di idrossido di potassio KOH, nella quale sono immersi i due elettrodi.

Il funzionamento di una *fuel cell* è riportato schematicamente in **Figura 53**. Il combustibile idrogeno H_2 viene alimentato all'anodo; l'ossigeno O_2 contenuto nell'aria entra nella cella attraverso il catodo.

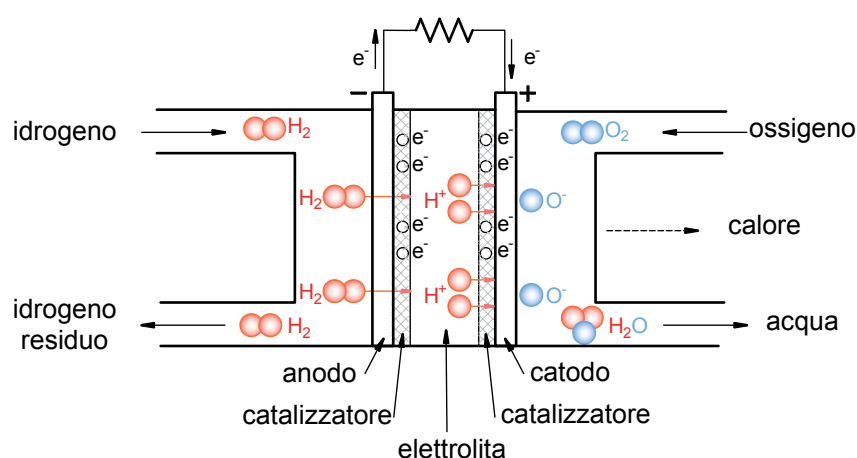
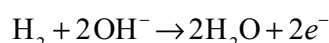


Figura 53
Schema del funzionamento di una cella a combustibile.

All'*anodo*:

- gli atomi di idrogeno si scindono in protoni H^+ e liberano elettroni;
- i protoni reagiscono con gli ioni OH^- dell'elettrolita e formano acqua;
 - l'acqua passa nella soluzione elettrolitica, mentre
 - gli elettroni creano una corrente che circola lungo un circuito esterno.

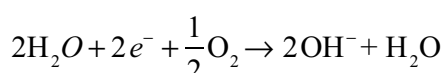
All'anodo avviene perciò la seguente reazione chimica:



Al *catodo*:

- l'ossigeno reagisce con l'acqua e con gli elettroni provenienti dal circuito esterno e forma:
 - ioni OH^- che migrano all'anodo e chiudono in questo modo il circuito elettrico;
 - acqua che viene raccolta fuori dalla cella.

Al catodo avviene la reazione chimica:



L'idrogeno usato nella cella può essere ricavato da vari combustibili (gas naturale, metano, biogas, metanolo, gas di sintesi ecc.). Le celle tuttavia possono essere alimentate anche con combustibili diversi dall'idrogeno, ad esempio con una miscela gassosa di idrogeno e ossido di carbonio ($H_2 + CO$).

Ogni cella produce una tensione abbastanza piccola (circa 0,6 volt). Per riuscire a ottenere la potenza e il voltaggio desiderati occorre quindi porre in serie più celle. Esse vengono raggruppate (*stack*) e assemblate per ottenere i generatori della potenza richiesta.

Di norma le celle a combustibile vengono classificate o in base all'elettrolita utilizzato o in base alla temperatura di funzionamento.

In base all'elettrolita le celle a combustibile sono distinte in alcaline, ad acido fosforico, a carbonati fusi ecc.; in base alla temperatura d'esercizio si hanno: celle ad alta temperatura ($600 \div 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), a media temperatura ($60 \div 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a bassa temperatura (fino a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Celle a combustibile sono state impiegate per cinquant'anni nei sistemi energetici delle missioni spaziali.

Le celle a combustibile presentano i seguenti aspetti:

Positivi:

- bassa manutenzione;
- rendimento elettrico elevato;
- possibilità di utilizzare vari combustibili per estrarre l'idrogeno;
- ridotto impatto ambientale (silenziosità e assenza di emissioni gassose);
- possibilità di utilizzazione del calore generato (usi sanitari, condizionamento di ambienti ecc.).

Negativi:

- alto costo per le applicazioni commerciali, anche se attualmente si cerca di ridurre i costi e aumentare la flessibilità operativa.

Applicazioni delle celle a combustibile:

- nel settore automotive (**Figure 54a, b**);
- a uso residenziale.

In quest'ultimo caso le celle a combustibile funzionano in modo ideale come generatori di potenza:

- connessi con la rete elettrica, per fornire potenza supplementare;
- connessi con una rete indipendente, per un servizio locale nelle zone non raggiunte dalle linee elettriche.

Figura 54

a Vettura Toyota funzionante a celle a combustibile;
b vano motore.

