

## Approfondimento

# Impianti termonucleari

La **centrale nucleare** (o **elettronucleare**) è un impianto per la produzione di energia elettrica che utilizza il calore prodotto da una reazione di fissione nucleare, autoalimentata e controllata, per generare vapore (o gas come l'anidride carbonica) a temperatura e pressione elevate, adatto ad alimentare turbine collegate ad alternatori (volume 1, capitolo 23, paragrafo 8).

In sostanza una centrale nucleare differisce da una centrale termoelettrica per la presenza del **reattore nucleare**, che sostituisce il tradizionale generatore di vapore basato sulla combustione.

Tutte le centrali nucleari oggi funzionanti si basano sul procedimento di **fissione**, cioè di scissione di atomi pesanti mediante bombardamento con neutroni.

Il procedimento alternativo della **fusione** consiste invece nell'unione di due atomi leggeri, trizio e deuterio, che danno luogo a un nucleo di elio e un neutrone, liberando un'enorme quantità di energia termica. Reattori a fusione continuano a essere oggetto di studi e sperimentazioni perché ridurrebbero sostanzialmente il problema delle scorie. I risultati appaiono ancora lontani dalla realizzazione di impianti stabilmente utilizzabili; i progetti in corso a livello internazionale (ITER, DEMO, PROTO) richiedono l'impiego di ingenti capitali e non hanno un orizzonte temporale realisticamente prevedibile.

Le moderne centrali nucleari hanno una potenza compresa orientativamente tra i 500 MW e i 1500 MW, con una durata di funzionamento media intorno ai 30-40 anni. Al termine del periodo di funzionamento l'impianto va smantellato, con una bonifica del terreno e uno stoccaggio delle scorie radioattive; questi aspetti assumono negli impianti nucleari particolare rilevanza sia tecnico-economica, sia per la sicurezza. In particolare lo stoccaggio delle scorie si presenta particolarmente problematico, a motivo della durata secolare dei decadimenti radioattivi, e stenta a trovare soluzioni soddisfacenti da tutti i punti di vista.

L'incidenza delle operazioni conseguenti alla chiusura delle centrali nucleari contribuisce a ridurre il vantaggio economico dovuto al basso costo specifico del combustibile.

Nella conversione del calore in energia elettrica le centrali nucleari hanno un rendimento piuttosto basso (30%-35%), a causa delle temperature non elevatissime del vapore che producono. Le centrali termo-elettriche a metano a ciclo combinato hanno rendimenti dell'ordine del 50%-55%.

Il consumo specifico di combustibile è dell'ordine di 30 kg/MW<sub>el</sub> di ura-

nio arricchito all'anno, che corrispondono a oltre 150 tonnellate di uranio naturale. La produzione dell'uranio richiede l'estrazione di grandi quantitativi di roccia, che rimangono presso il luogo di estrazione, di acidi e acqua per la concentrazione del minerale stesso.

Reattori nucleari a livello mondiale (aprile 2011)						
Paese	Reattori operanti	Potenza elettrica (MW)	Età media	Reattori in costruzione	% Energia elettrica	% Energia primaria
Canada	18	12 569	26		15%	6%
Cina	13	10 048	8	27	2%	1%
Francia	58	63 130	24	1	74%	38%
Germania	17	20 740	28		27%	11%
India	20	4388	18	5	3%	1%
Giappone	48	42 277	24	2	29%	13%
Russia	32	22 693	27	11	17%	6%
Sud Corea	21	18 657	17	5	32%	14%
Svezia	10	9304	31		38%	28%
Ucraina	19	10 097	21	2	48%	17%
Regno Unito	15	13 107	28		18%	8%
USA	104	100 683	30	1	20%	9%
<b>UE 27</b>	<b>143</b>	<b>130 823</b>	<b>27</b>	<b>6</b>	<b>28%</b>	
<b>Mondo</b>	<b>436</b>	<b>370 446</b>	<b>26</b>	<b>64</b>	<b>13%</b>	<b>5,5%</b>

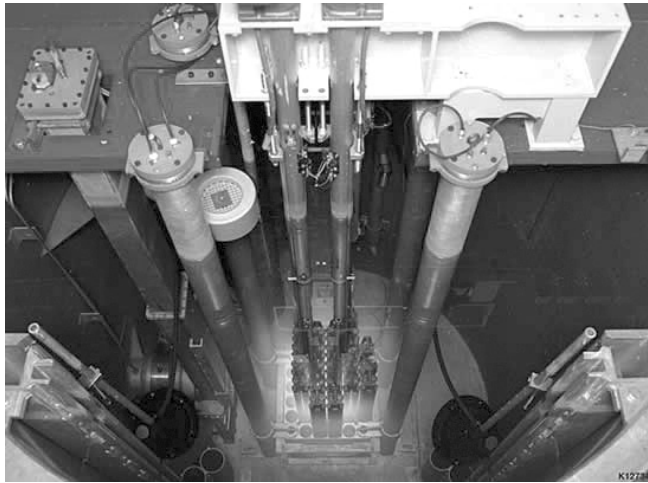
Fonti: IAEA-BP

## Reattore nucleare a fissione

In un **reattore nucleare** avviene una reazione a catena di fissione in maniera controllata in modo da garantire determinati standard di sicurezza; nel nocciolo del reattore è presente la sorgente di energia, costituita da materiale fissile (si usa, anche se impropriamente, parlare di combustibile nucleare): comunemente una miscela di  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  arricchita fino al 5% di  $^{235}\text{U}$  oppure uranio naturale o una miscela di ossidi di uranio e plutonio.

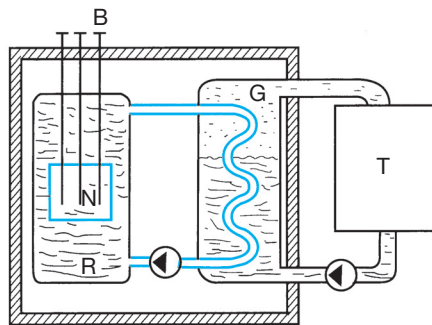
Per aumentare la probabilità di fissionare il combustibile, cioè di provocare la rottura dei nuclei attraverso collisioni con neutroni liberi, occorre rallentare i neutroni mediante un **moderatore**.

La fissione del nucleo genera energia cinetica nei prodotti della fissione; rallentati, essi convertono tale energia in calore, asportato da un fluido refrigerante gassoso o liquido e trasportato, direttamente o indirettamente per mezzo di generatori di vapore, a un gruppo turbo-alternatore per la produzione di energia elettrica. Il termovettore refrigerante può anche essere il moderatore stesso, come avviene nel caso dei reattori ad acqua leggera.



Quando viene raggiunta la cosiddetta *massa critica*, la reazione di fissione a catena raggiunge una stabile condizione di autosostentamento.

Le **barre di controllo**, costituite da leghe di argento, cadmio e indio o carburi di boro, sono inserite nel nocciolo per assorbire i neutroni in eccesso liberati dalla reazione; servono a tenere sotto controllo la reazione a catena in caso di criticità e a regolarla in funzione della potenza da generare (figura).



Liberando enormi quantitativi di energia, uno sviluppo incontrollato della reazione potrebbe provocare la *fusione del nocciolo* con temperature elevatissime; è questo il caso più grave di **incidente nucleare** con successivo cedimento degli strati esterni di contenimento e la dispersione nell'ambiente di materiale radioattivo e/o produzione di gas esplosivi con gravissime conseguenze sulla sicurezza pubblica. Incidenti di questo tipo sono avvenuti, con diverse modalità e intensità, nei reattori di Chernobyl (1986) e di Fukushima (2011).

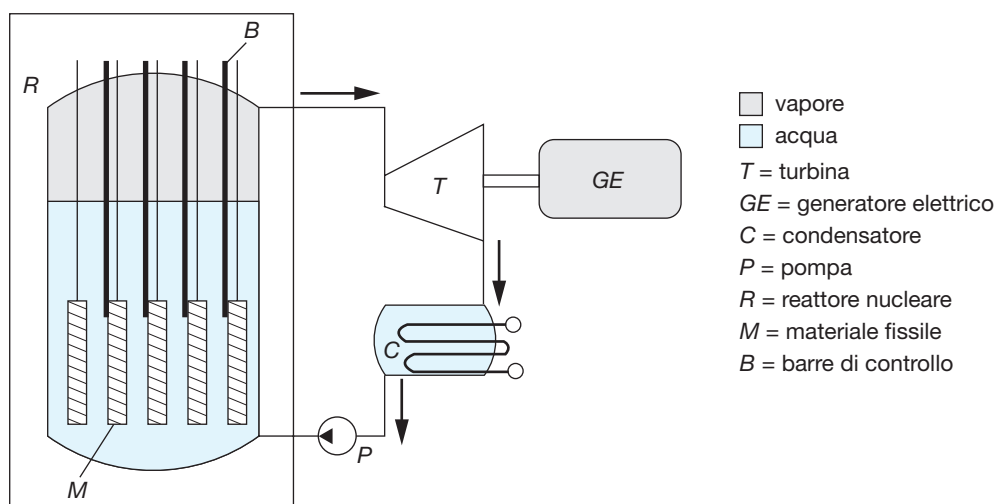
I reattori impiegati per usi civili sono classificati in generazioni successive; si differenziano principalmente per:

- tipo di combustibile utilizzato;
- sistema di raffreddamento e di moderazione;
- sistemi di sicurezza adottati.

Dopo i modelli sperimentali della prima generazione, si sono affermati quelli del tipo **gas-grafite**: il gas ( $\text{CO}_2$ ) per il raffreddamento, la grafite come moderatore. Le due versioni più diffuse di reattori sono i Magnox (*Magnesium Uranium Oxide*) e gli RBMK, entrambi alimentati con uranio arricchito. Il reattore di Chernobyl era del tipo RBMK.

Si sono successivamente diffusi i modelli raffreddati e moderati ad acqua, che sono come delle caldaie in cui anziché un focolare è presente un nucleo di elementi fissili; si differenziano due *filiere* (schemi in figura):

- **BWR** (*Boiling Water Reactor*), in cui l'acqua è vaporizzata a contatto con gli elementi di combustibile o comunque nello stesso recipiente; il vapore inviato in turbina è quindi più o meno debolmente radioattivo;
- **PWR** (*Pressurized Water Reactor*), che utilizzano un circuito intermedio, per cui un fluido refrigerante (di solito ancora acqua) entra a contatto con il materiale fissile, si scalda e, senza vaporizzare, cede calore ad altra acqua, circolando in un generatore di vapore esterno. Il vapore che arriva in turbina non è quindi radioattivo.



Per utilizzare una produzione più economica con uranio non arricchito è stato ideato il reattore CANDU (*Canada Deuterium Uranium*) sviluppato dall'Atomic Energy Commission del Canada, che utilizza come fluido refrigerante e come moderatore l'acqua pesante (acqua con presenza significativa di deuterio, isotopo pesante dell'idrogeno), che riduce sensibilmente la probabilità di cattura dei neutroni.

I reattori della *terza generazione* riprendono le caratteristiche fondamentali della *seconda generazione*, prevedendo però un approccio progettuale con maggiori garanzie di sicurezza; la cosiddetta *quarta generazione* resta sostanzialmente ancora a livello di studio e di sperimentazione parziale per iniziativa di un consorzio internazionale.

Di derivazione militare sono i reattori *autofertilizzanti veloci* (*Fast Breeder Reactor*); la denominazione veloci dipende dal fatto che i neutroni emessi non vengono rallentati da un moderatore. Inoltre sono detti autofertilizzanti perché, partendo da  $^{238}\text{U}$ , producono plutonio ( $^{239}\text{Pu}$ ), utilizzabile a sua volta come combustibile fissile.

Il refrigerante è un metallo liquido, in particolare il sodio che si mantiene liquido senza necessità di compressione fino a 800 °C, con lo svantaggio però di essere infiammabile a contatto con l'aria ed esplosivo a contatto con l'acqua.

A questa tipologia appartiene il reattore francese Superphénix, oggi inutilizzato per problemi tecnici.