

ENERGIA OLTRE IL PETROLIO IL NUCLEARE?

Molti sperano che potrà essere l'energia delle fonti rinnovabili a sostituire quella fornita oggi dai combustibili fossili in via di esaurimento. Altri credono che sarà la fusione nucleare controllata a fornire l'energia che ci è ormai indispensabile. Chi ha ragione?

DI FRANCO NUZZO

Questo oleodotto di 120 cm di diametro è lungo 1.200 km e porta il petrolio attraverso l'Alaska fino al porto di Valdez, dal quale viene trasportato via nave alle raffinerie del continente. Attraversa oltre 800 corsi d'acqua. Qui è fotografato sul fiume Tanana.

L'energia è indispensabile per qualunque azione umana. Per far funzionare il suo stesso organismo l'uomo usa l'energia che ottiene bruciando zuccheri, grassi ed altre sostanze, grazie all'ossigeno contenuto nell'aria che respira.

Se rivolgiamo la nostra attenzione all'energia muscolare, ci rendiamo subito conto di come questa sia stata per molto tempo la forma di energia prevalentemente usata dall'uomo per svolgere lavori necessari alla sopravvivenza sul nostro pianeta (la caccia, la pesca, l'agricoltura...), ma anche per la lavorazione del legno e della pietra e perfino per la costruzione delle piramidi... L'uso dell'energia muscolare umana fu inizialmente tanto diffuso e insostituibile da generare il fenomeno dello schiavismo, sebbene anche l'energia



Aratura tradizionale con i buoi ad Hampi, in India.

muscolare animale poteva servire bene allo scopo di tirare un aratro o far girare una mola per macinare il grano. All'energia muscolare si affiancò poi l'energia del fuoco (per consentire la cottura dei cibi, il riscaldamento in presenza di basse temperature ambiente, la lavorazione della cera-

mica e dei metalli...), l'energia del vento (per muovere le barche, ad esempio) e quella dell'acqua corrente (per azionare mulini e, grazie ad essi, anche pompe e macchine utensili). In questa prima ma lunghissima fase dell'evoluzione, le varie forme di energia disponibili (muscolare, termica, eolica, idraulica...) non venivano trasformate, se non in minima parte, in altre forme di energia. Tutto iniziò a cambiare molto velocemente quando venne inventato il motore a vapore, in grado di trasformare in energia meccanica l'energia termica generata dalla combustione di legna, carbone, o altro. Fu l'energia fornita dal carbone (fondamentale per la produzione dell'acciaio) a consentire la prima rivoluzione industriale. Ma il grande progresso tecnologico iniziò veramente con l'inven-



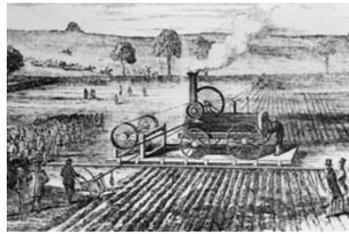
ENERGIA & LAVORO

ENERGIA (ενέργεια = capacità di lavoro)

In senso fisico, il lavoro è una grandezza equivalente all'energia, e assume diverse espressioni a seconda di quale energia lo genera e a seconda dei suoi stati iniziale e finale. Così, per l'energia cinetica, il lavoro si esprime come la forza (che muove una massa) per la distanza percorsa.

$\Delta L = F \times \Delta s$ (dove ΔL è la quantità di lavoro, F la forza e Δs la distanza). Nel caso dell'energia potenziale di un gas sotto pressione, il gas compie lavoro diminuendo la sua pressione ed espandendo il suo volume:

$\Delta L = p \times \Delta v$ (dove p è la pressione e Δv la variazione di volume). Le due formule "F x Δs " e "p x Δv " sono in realtà dimensionalmente equivalenti. Infatti, facendo una verifica dimensionale, la pressione F/s^2 [forza diviso area] per s^3 [volume] equivale alla forza per una lunghezza, che sono le dimensioni di un lavoro (misurato in joule). Legato a energia e lavoro è anche il concetto di potenza, che è una misura della velocità di erogazione del lavoro. Nel sistema internazionale la potenza si misura in watt (1 watt = 1 joule/secondo) dal nome dell'ingegnere e inventore britannico, James Watt, che ideò e costruì il primo motore a vapore realmente funzionante (1769).



Incisione del 1861 che mostra uno dei primissimi esperimenti di aratura nei quali, invece dei tradizionali animali usati per trainare l'aratro (cavalli o buoi), venne usato il motore a vapore di un trattore agricolo.

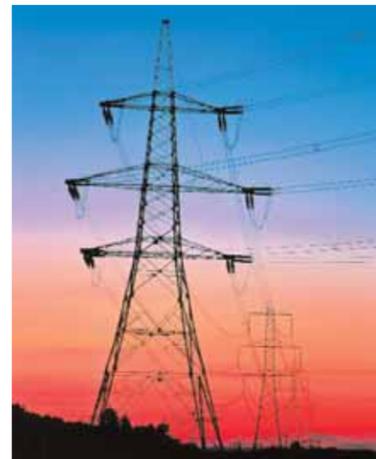
James Watt (1736-1819), tecnico scozzese, introdusse molti miglioramenti al motore a vapore di Thomas Newcomen, tanto che nel 1790 il motore di Watt aveva già completamente sostituito la precedente tipologia. Il motore di Watt prevedeva una minore dispersione del calore utile, il pistone a doppio effetto (azionato da entrambi i lati), il controllo centrifugo della erogazione del vapore e uno strumento per la



misura della pressione. Le sue invenzioni, grazie anche all'acume commerciale del suo socio Matthew Boulton, lo fecero arricchire.

zione dei motori funzionanti a petrolio e a gas naturale, che consentirono la generazione di energia elettrica in gran quantità (in particolare tramite turbogeneratori alimentati a gas). L'elettricità può essere trasportata con perdite non eccessive anche a grande distanza (ad esempio, l'energia idroelettrica prodotta grazie al fiume Congo si potrebbe portare in Italia in corrente continua con cavi sottomarini ad 1 megavolt, perdendone per

Linea aerea per il trasporto dell'energia elettrica ad alta tensione, dalle centrali generatrici alle sub-stazioni di distribuzione locale.



strada solo il 15%) e può essere utilizzata in moltissimi modi diversi, sia per generare calore che per essere trasformata in energia meccanica o altro.

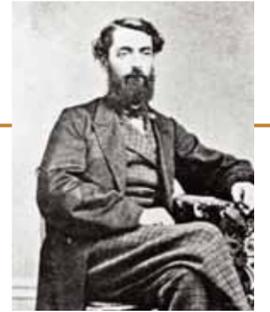
IL LEGNO

Il fuoco prodotto dalla combustione del legno è stato per lungo tempo la primaria fonte di energia a sostegno dell'artigianato e dell'industria della ceramica e dei metalli.

Oltre ad essere bruciato direttamente, il legno può essere usato anche per produrre quello che si chiama "carbone da legno", che si ottiene sottoponendo il legno, appunto, a temperature di circa 540 gradi Celsius in assenza di

MIND 2 - Agosto/Settembre 2005

EDWIN DRAKE



Il primo "boom" del petrolio avviene quando il colonnello Edwin Drake trova un modo pratico di estrarre grandi quantitativi di quest'ultimo, per mezzo di un dispositivo di perforazione a cavo che gli dà accesso ad una grossa falda petrolifera ad Oil City in Pennsylvania, nel 1859. Questo metodo soppianta istantaneamente i pozzi scavati a mano e marca ufficialmente, se vogliamo, l'inizio dell'era moderna.

Edwin Laurentine Drake (1819-1880) nato a Greenville, nello stato di New York, cominciò la sua carriera come conduttore di treni ma poi, affascinato dall'idea di trovare l'oro nero, sviluppò l'idea che la perforazione sarebbe stata la maniera migliore per trovare il petrolio. Organizzò la Seneca Oil Company, affittò del terreno promettente e il 27 Agosto del 1859 trovò del petrolio ad una profondità di circa 20 metri. Questo primo pozzo petrolifero fu perforato vicino a Titusville, Pennsylvania. Gli storici tracciano l'inizio dell'industria del petrolio su larga scala a questa prima iniziativa. Drake usò un vecchio motore a vapore per azionare la perforatrice ed ebbe successo. Il primo pozzo di petrolio al mondo era stato realizzato e messo in servizio. Il petrolio creò ricchezze per molte persone e molti Stati, ma non per Drake. Il suo ridotto senso degli affari lo isolò ed impoverì. Nel 1876 gli fu assegnata una pensione dallo Stato della Pennsylvania, dove rimase fino alla sua morte, avvenuta nel 1880 a Bethlehem.



L'acciaio, che è una lega ferro-carbonio, può essere addizionato di altri elementi per conferirgli caratteristiche particolari. Il tecnico controlla il versamento di ferro fuso in una fornace BOF, nella quale le impurità del ferro vengono convertite in ossidi facilmente asportabili.

aria. Il legno in quelle condizioni si trasforma in un solido poroso contenente dall'85 al 98% di carbonio. Nel diciannovesimo e ventesimo secolo il legno e il carbone da legno sono stati impiegati come combustibili nelle macchine motrici a vapore nel campo dei trasporti (na-

vigazione e locomotive), come combustibili industriali e come combustibili domestici per il riscaldamento degli ambienti in camini e stufe a legna. Nel sedicesimo secolo, in Inghilterra, la disponibilità di legno venne a mancare, causando lo spostamento dell'industria del ferro prima in Irlanda e poi in Sco-

zia, dove il legno continuava ad abbondare. Fino alla rivoluzione industriale del diciannovesimo secolo, il fabbisogno energetico pro capite rimaneva basso e lo sfruttamento della biomassa (principalmente il legno), delle bestie da soma e degli schiavi era sufficiente a fornire l'energia necessaria. Nel diciannovesimo secolo il legno, in tempi brevi, lasciò il posto al carbone fossile da miniera e nel ventesimo secolo quest'ultimo venne sostituito in molti settori dal petrolio e dal gas naturale (composto principalmente da metano, butano e propano).

L'AUTORE

L'ingegner Franco Nuzzo, laureatosi in Ingegneria meccanica presso l'Università di Roma nel 1972, inizia la sua carriera nel settore petrolchimico prima in Italia e poi in Canada e negli Stati Uniti, a partire dal 1977. Nel 1979, a seguito della crisi del petrolio, si sposta nel settore nucleare che da allora non abbandona più. In Canada partecipa alla progettazione, costruzione e messa in servizio dei sistemi nucleari di processo dei reattori CANDU della seconda generazione. Dal 1991 al 1993, negli Stati Uniti, per conto della Nuclear Regulatory Commission (USNRC), partecipa in qualità di consulente a ispezioni funzionali dei sistemi nucleari dei reattori delle regioni del Nord Est e Sud Est, nel quadro dello sforzo di miglioramento delle prestazioni degli impianti americani. Ritornando in Canada nella provincia del Saskatchewan, ricopre varie cariche dirigenziali nella progettazione di reattori della terza generazione. Dal 2000 al 2003 dirige un gruppo di ingegneria residente per la riabilitazione del primo reattore di Pickering sul lago Ontario, lavoro per il quale riceve una menzione e un premio presidenziale. Attualmente ricopre la carica di Direttore dell'Ingegneria dei Sistemi nell'ufficio dell'ingegnere capo, in una ditta di progettazione e di ricerca nucleare canadese. È l'autore di molte monografie sui sistemi di raffreddamento e sulla sicurezza dei reattori nucleari in vari congressi e conferenze sull'energia nucleare ed ha rappresentato negli ultimi sei anni il Canada nella stesura di norme e pubblicazioni sugli impianti nucleari dell'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica (IAEA), a Vienna.



ENERGIA

I COMBUSTIBILI FOSSILI

I combustibili fossili (carbon fossile, petrolio, gas naturale) contribuiscono per ben l'80% all'approvvigionamento energetico globale.

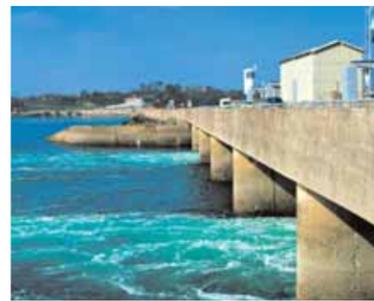
Le riserve di carbon fossile sono sostanziose e sono distribuite più uniformemente che non il petro-



IN ALTO: Piantagioni di pioppi possono essere usate per produrre energia rinnovabile. Tagliando le giovani piante ogni tre mesi si può ricavare energia dalla loro combustione, mentre la potatura stimola una veloce ricrescita. Con questo metodo non aumenta la quantità di anidride carbonica totale nell'atmosfera, come accade invece con i combustibili fossili.

IN BASSO: Una miniera a cielo aperto nello stato del Sakha (una Repubblica dell'ex Unione Sovietica, in Asia Centrale). La raccolta a cielo aperto, in luogo dei più conosciuti tunnel, viene attuata quando lo strato di materiale che ricopre i depositi di carbone è particolarmente sottile.

lio e il gas. Ma l'uso del carbon fossile sotto forma di antracite e di bituminosi può produrre un livello d'inquinamento locale pericoloso per la salute. **Oggi, in verità, esistono tecnologie avanzate di controllo dell'inquinamento da carbone, capaci di eliminare quasi interamente i nitrati e l'anidride solforosa. Inoltre, il rendimento delle centrali a carbone è cresciuto notevolmente (arrivando ad oltre il 45%),** contribuendo così alla diminuzione del consumo del combustibile per megawatt prodotto (consumo specifico) e favorendo quindi il rallentamento degli effetti nefasti della combustione. Il rapporto riserva/produzione dei combustibili fossili dà un'indicazione del numero di anni rimasti al loro esaurimento. Nel caso del carbone si tratta di 150 anni; per il petrolio, invece, il rapporto riserva/produzione si aggira sugli 80 anni nel Medio Oriente, sui 40 nelle Americhe Centrale e Meridionale e sui 10 anni nell'America Settentrionale, escludendo i ricchi depositi di sabbie bituminose e gli oli pesanti del Canada (recenti stime li pongono nell'ordine di 180 miliardi di barili di grezzo bituminoso). Inoltre, il Nord America possiede un potenziale notevole nel campo delle riserve di gas non convenzionali, come il metano ricavabile da giacimenti di carbone, il cosiddetto *coal bed methane* (CBM), il gas estratto dai letti oceanici profondi e quello ricavato dagli idrati gassosi. Il petrolio e il gas sono impiegati sia nella produzione di energia elettrica che nel settore dei trasporti, nonché per la fabbricazione delle materie plastiche. Oggi il consumo di petrolio negli Stati Uniti supera i 20 milioni di barili al giorno, il 26% del consumo totale nel mondo: un ammontare maggiore del consumo



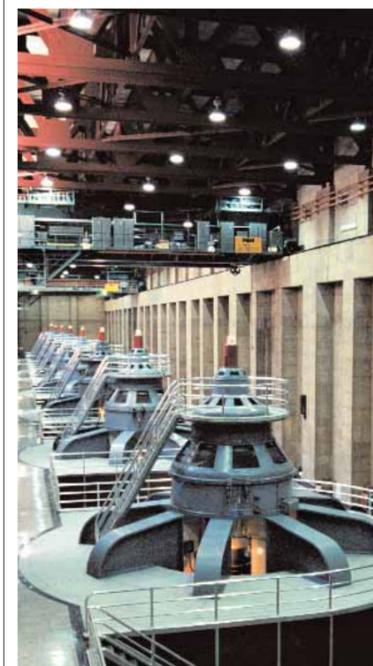
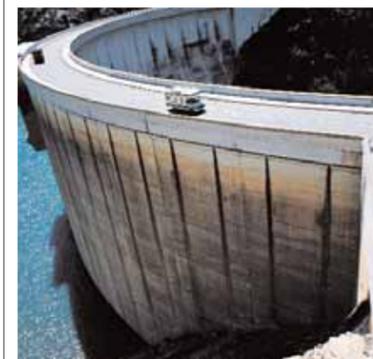
Centrale elettrica sul fiume Rance (in Francia) che sfrutta il dislivello creato dalle maree. Grazie alle chiuse, ora aperte, viene controllato il flusso dell'acqua dal mare all'estuario del fiume, e viceversa. La diga crea un lago artificiale di 22 Km². Il dislivello generato dalle maree può raggiungere un massimo di 13,5 m. Le 24 turbine, durante l'uscita dell'acqua dal lago, possono produrre un totale di 240 MW.

dell'Europa e dell'Africa messe insieme. Due terzi delle riserve mondiali di petrolio e gas sono nel Medio Oriente (Arabia Saudita, gli Stati del Golfo, Iran e Iraq). Quantità notevoli sono situate nel bacino del Mar Caspio (Azerbaijan, Kazakistan, Russia, Turkmenistan ed Iran). Calcolando il rapporto riserva/produzione, si ricavano gli anni rimasti all'esaurimento del petrolio e si ottiene circa 86 anni. È chiaro, perciò, che il petrolio, oltre ad essere inquinante (sia pure meno del carbone), è una risorsa molto limitata, che dovrà essere sostituita da forme diverse di energia. Oltre al carbone e al petrolio, come abbiamo visto, anche il gas naturale ha un ruolo importante come fonte di energia primaria da combustione. Per esempio, nelle turbine a gas a ciclo combinato si può produrre elettricità con un rendimento molto elevato. Questi motori comprendono un compressore d'aria, una camera di combustione dove il gas naturale è iniettato nel flusso di aria compressa, bruciato, espanso in una turbina e scaricato attraverso un ugello. L'espansione del gas in turbina produce lavoro. Parte del lavoro è usato per

azionare il compressore d'aria. Il resto è il lavoro utile che si usa per azionare un generatore elettrico. Il gas naturale è una risorsa relativamente pulita rispetto al petrolio, ma come il petrolio è una risorsa fossile limitata.

LE ALTERNATIVE

Oltre agli idrocarburi, che sono risorse a termine, abbiamo anche a disposizione una serie di tecnologie che ricavano energia da sorgenti virtualmente perenni.



IL CICLO DI CARNOT

La termodinamica ci insegna che una macchina termica per funzionare ha bisogno di una fonte di calore (fornito dal combustibile che brucia) e di un pozzo di assorbimento, che nel caso reale è l'atmosfera in cui i gas di scarico vengono rilasciati. Considerando sorgenti e pozzi di calore idealmente infiniti, il massimo rendimento termico ottenibile da un motore secondo la teoria termodinamica è dato dal rendimento di Carnot: $\eta = 1 - T_c/T_h$ (dove η è il rendimento e T_c e T_h sono rispettivamente le due temperature tra cui lavora il motore). In pratica, è impossibile ottenere il massimo rendimento termico da un motore reale, ma il rendimento ideale di Carnot serve come metro di misura e ci indica soprattutto che rendimenti più alti si ottengono inserendo calore a temperature (T_h) più alte possibili e rilasciandolo a temperature (T_c) più basse possibili. Le turbine a gas, ad esempio, sono motori che utilizzano calore a temperature relativamente alte (1200°C, che è la temperatura nominale di uscita dalla camera di combustione) ma che rigettano il calore a temperature ancora troppo alte (circa 500°C, che è la temperatura nominale del gas uscente dall'ugello di scarico). Perciò il rendimento di una turbina a gas non è dei migliori. La turbina a gas va dunque combinata con un altro motore capace di utilizzare il contenuto calorico dei gas di scarico a 500°C per produrre energia aggiuntiva. Questa combinazione è ottenibile con i cosiddetti impianti a cicli combinati.



Disegno al computer dell'interno del cilindro di un motore a scoppio. Nell'immagine viene mostrata l'accensione della miscela aria-benzina attuata con una scintilla elettrica da parte della candela. Grazie alla combustione della benzina, l'aria contenuta nella camera di scoppio si riscalda fino ad oltre 2.000°C ed espandendosi spinge il pistone verso il basso, raffreddandosi, quindi, fino alla temperatura di scarico (di alcune centinaia di gradi Celsius).

IN ALTO A SINISTRA: La diga della centrale idroelettrica di Tignes les Boisses (Francia). La diga causa artificialmente un grande dislivello fra il bacino d'acqua a monte e le turbine posizionate in basso. La enorme pressione risultante viene usata per far girare le turbine collegate a generatori elettrici. La centrale di Tignes produce una media di 154 GWh ogni anno.

IN BASSO: Otto dei generatori elettrici della centrale di Hoover Dam, sul fiume Colorado (Nevada). La centrale idroelettrica contiene 17 generatori, mossi da turbine ad acqua poste sotto al pavimento visibile in foto, ed ha una capacità totale di 2.000 MW.

Esistono fonti di energia come l'irradiazione solare, il vento, le risorse idriche sulla superficie terrestre, le maree indotte dalla forza di gravità lunare, i geysir e altre risorse termali localizzate.

Si tratta di fonti praticamente inesauribili.

In una categoria tutta particolare ci sono il nucleare ed il termonucleare, che dipendono generalmente da risorse di

ENERGIA

Acqua surriscaldata e vapore emessi dal geyser Pohutu a Whakarewarewa (Nuova Zelanda). Il calore, trasportato alla superficie della Terra dall'acqua proveniente da grandi profondità, può essere utilizzato per generare elettricità.

A DESTRA: Tubazioni isolate termicamente che trasportano vapore acqueo alle turbine dei generatori elettrici. Questa centrale di Wairakei (Nuova Zelanda) ha una capacità produttiva di 153 MW di elettricità.



grande portata e meno inquinanti, ma che pongono sfide di carattere tecnico ed economico.

La forma di energia rinnovabile più ovvia e immediata è quella idraulica, basata sulla trasformazione del potenziale gravitazionale dei fluidi in movimento sulla superficie terrestre. Nel campo dell'idroelettrico, infatti, lo sfruttamento è già molto avanzato. Negli Stati Uniti, per esempio, nel 2002 la potenza idroelettrica installata toccava i 98 gigawatt, pari a circa il 10% della potenza energetica totale installata degli USA. Il potenziale economicamente giustificabile dell'energia idroelettrica tuttora disponibile è stimato a circa tre volte i quasi 3.000 TWh (terawattora) idroelettrici annui prodotti globalmente.

L'idroelettrico comporta delle emissioni ridotte, principalmente dovute al marcire della materia organica. Comporta però anche uno sbilancio ecologico a monte e a valle delle dighe e richiede un altissimo capitale iniziale che rende questo tipo di sfruttamento difficile, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo. Nonostante questi svantaggi, però, il settore idroelettrico rimane molto attraente dal punto di vista della disponibilità dell'acqua motrice, del costo di manutenzione ridot-

to, della flessibilità della produzione (come la possibilità di partenze a freddo), di un completo controllo voltaico e di bassi costi di produzione. **L'energia di provenienza idroelettrica rappresenta attualmente circa il 6% della produzione elettrica totale mondiale.**

Un'altra forma di potenziale gravitazionale che è possibile sfruttare è il movimento delle maree, che ha visto un certo sviluppo commerciale. Altra possibilità interessante risiede nell'energia termica degli oceani, che si potrebbe raccogliere sfruttando per esempio la differenza di temperatura tra l'acqua superficiale e l'acqua più fredda in profondità; ma anche questa fonte di energia rinnovabile è di difficile accesso. **Gli oceani, comunque, rimangono una sorgente di energia impressionante che richiederà uno sforzo di ricerca e di sviluppo notevole.**

L'energia geotermica è il calore contenuto nella Terra. Una volta catturato, questo calore può essere utilizzato per il riscaldamento ambientale e per la generazio-

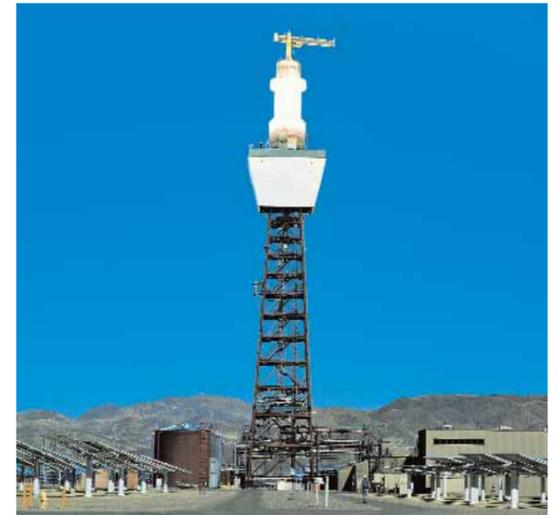
ne elettrica. Risorse geotermiche sono state identificate in circa 80 Paesi, ma solo la metà le sfrutta in maniera adeguata. La generazione di elettricità di questo tipo è relativamente costosa ed il rendimento basso, variando dal 5 al 20%. La disponibilità di questa forma di energia nel mondo è però enorme. Si tratta di 12.000 terawatt (12 petawatt) di riserve geotermiche identificate. Di queste comunque solo l'1%, ossia 120 terawattora all'anno, potrà diventare una riserva economica da sfruttare nei prossimi 50 anni. **L'energia solare** può essere catturata direttamente usando sistemi fotovoltaici o indirettamente, attraverso la sua concentrazione e la sua conversione in energia termica, utilizzando fluidi intermedi come l'aria e l'acqua. Nei sistemi fotovoltaici, le celle fotovoltaiche fanno uso di materiali semiconduttori per catturare l'energia solare e convertirla direttamente in elettricità, con rendimenti intorno al 40% al momento attuale, sebbene nei laboratori di ricerca si sia già raggiunto il 65%. Il limite teorico per

i fotovoltaici è dell'85%. Questo tipo di sistema è particolarmente adatto allo sfruttamento nello spazio, nel campo delle comunicazioni, in certi sistemi di manovra a distanza e in certe applicazioni in navigazione. Purtroppo, nel campo della generazione elettrica, l'energia solare presenta ancora costi notevoli e soprattutto manca di affidabilità, poiché il Sole non è a disposizione con continuità e, quando lo è, non presenta sempre la stessa intensità.

Le cellule fotovoltaiche generano elettricità senza parti in movimento, operano silenziosamente e sono di bassa manutenzione. Variano da piccole unità residenziali, da 5 a 100 kilowatt, a unità da oltre 100 kilowatt, che possono essere connesse commercialmente, alle reti di distribuzione.

Nei sistemi indiretti, grandi specchi parabolici e torri di ricezione centralizzate sono usati per concentrare le radiazioni solari, con lo scopo di riscaldare sia aria sia vapore, che poi, espandendosi, fanno girare un turbogeneratore

In questa centrale elettrica solare, 2.000 specchi posti a terra concentrano la luce del Sole verso la sommità della torre, dove il calore viene usato per produrre vapore che aziona i turbogeneratori. Questa torre, che si trova a Barstow (California), può anche accumulare calore in un serbatoio di sale fuso, dal quale lo preleva per fornire energia elettrica anche quando il Sole si oscura temporaneamente.



per produrre elettricità. Questi sono sistemi a costo relativamente basso. Ricerche sono in corso per migliorare la capacità di accumulazione dell'energia, per coprire i periodi in cui il Sole non brilla, e per sviluppare delle unità di grossa potenza. È una tecnologia che presenta vantaggi ecologici non indifferenti, visto che non produce emissioni. Oltre che per la produzione di elettricità, il 15% dell'energia solare nel mondo viene utilizzata

sotto forma di calore a bassa temperatura per il riscaldamento ambientale e dell'acqua, e in applicazioni industriali come calore di processo a bassa e media temperatura. **Il potenziale dell'energia solare è enorme, migliaia di volte il totale dell'energia primaria consumata nel mondo.** Investimenti nella ricerca per potenziare questo settore sarebbero però necessari per riuscire a raggiungere un tasso d'utilizzo significativo.

CICLO COMBINATO: TURBINE A GAS E A VAPORE

Lo sviluppo dei due tipi di turbine a gas e a vapore ha consentito il loro accoppiamento nei cosiddetti impianti a ciclo combinato, nei quali si riesce ad ottenere rendimenti più alti di quelli a cicli separati, costi più ridotti, maggiore affidabilità, il superamento delle norme di protezione dell'ambiente e l'aumento della flessibilità di servizio.



Il ciclo combinato comprende una turbina a gas, un generatore di vapore a calore di recupero, una turbina a vapore, oltre a, naturalmente, generatori elettrici. Con configurazioni di questo tipo si riescono ormai ad ottenere rendimenti dell'ordine del 60%. Rimangono però irrisolti i problemi dell'inquinamento da CO₂, delle riserve limitate di combustibili, dell'esposizione a instabilità dell'approvvigionamento e dei rischi di esplosione degli accumulatori di gas naturale a monte degli impianti.

Questa centrale elettrica basata su turbine a ciclo combinato a gas e vapore ha una potenza di 700 MW.

ENERGIA

L'energia eolica è derivata dall'energia solare, che causa differenze di calore e di pressione e produce movimenti di masse d'aria, risultanti in energia cinetica. Le macchine utilizzate per produrre energia elettrica dal vento sono le turbine eoliche, dotate di tre o più pale installate in cima a un palo, il più alto possibile per catturare il vento libero da ostacoli come alberi, colline e costruzioni, che interferirebbero con la sua velocità. La capacità di una turbina eolica può variare da qualche kilowatt per applicazioni residenziali ad alcuni megawatt. Generalmente, le turbine eoliche collegate alle reti di distribuzione sono raggruppate in grandi parchi eolici, che dal punto di vista estetico deturpano il paesaggio e rappresentano una trappola mortale per i volatili. La potenza installata di questi parchi varia da qualche megawatt a varie decine di megawatt. Il potenziale teorico dell'energia eolica, senza interferenze dal terreno, è sicuramente notevole. Invece la capacità attuale è purtroppo ridotta al 5% di quella teorica, a causa delle severe limitazioni dovute all'effetto del terre-



Turbine eoliche.

no. Un altro elemento limitativo del potenziale dell'energia eolica è la sua dipendenza da fattori climatici, che cambiano da una zona geografica all'altra e da un periodo all'altro. Poiché l'efficacia del vento dipende molto dalla zona di cattura, che è generalmente lontana dalle località di residenza degli utenti, si pone immediatamente il problema della trasmissione dell'energia. La discrepanza notevole tra la velocità angolare delle pale (di circa 60 giri al minuto) e i 1.800 giri e oltre necessari al funzionamento del generatore elettrico costringono inoltre all'uso di riduttori ad ingranaggi a rapporti altissimi, con perdite di rendimento apprezzabili. Un'altra limitazione delle turbine attuali sono i carichi strutturali applicati dal vento. Se il vento soffia troppo forte, le forze centrifughe possono facilmente superare la resistenza strutturale della turbina e danneggiare gravemente la macchina e l'ambiente circostante. Per ragioni di sicurezza la turbina viene allora fermata. Se il vento è invece troppo leggero, le pale non riescono a raggiungere la minima velocità necessaria al funzionamento del generatore e la turbina viene ancora fermata.

Per superare queste difficoltà si sono introdotte, ormai quasi ovunque, pale ad assetto variabile che permettono la regolazione della velocità angolare indipendentemente dalla velocità del vento, entro i soliti limiti minimi e massimi. L'uso di rotor a velocità variabile permette il miglioramento anche del controllo dei carichi strutturali, del fattore di utilizzazione e del rendimento. Si riesce in questo modo ad ottenere una maggiore stabilizzazione della produzione, anche se siamo ancora lontani dai valori di affidabilità richiesti dai gestori delle reti di distribuzione dell'energia elettrica.

IL NUCLEARE MODERNO

Lo sfruttamento dell'energia nucleare è basato sulla capacità di un particolare isotopo dell'atomo di uranio, U235, di dividersi spontaneamente e di emettere una particella chiamata neutrone.



Turbina a vapore per una centrale nucleare. Viene azionata dal vapore acqueo prodotto con il calore generato dal reattore. Si tratta di una turbina a vapore a bassa pressione.

Quando questo neutrone colpisce un altro atomo di U235, quest'ultimo si divide (fissione) producendo altri due neutroni e una reazione a catena viene innescata. **Se la concentrazione di U235 è sufficientemente alta (massa critica) il processo diventa autosufficiente: il reattore, cioè il serbatoio dov'è contenuto il materiale fissile, si dice critico e diventa capace di produrre grandi quantità di calore che si può trasformare in elettricità. Questo tipo di reattore si chiama termico perché usa i neutroni lenti, detti anche "termici".**

Due sistemi ausiliari sono necessari per controllare il processo e utilizzare il calore: sono il moderatore e il termovettore.

Il moderatore (o riflettore) è una

sostanza capace di frenare o riflettere i neutroni senza assorbire troppa energia. La grafite è un moderatore eccellente e a basso prezzo, ma è una sostanza combustibile ed infatti nel reattore di Chernobyl si è incendiata. L'acqua è un moderatore di media efficacia, ed è anche meno costosa della grafite. Se si usa l'acqua come moderatore, perché si inneschi la reazione a catena bisogna arricchire artificialmente l'uranio naturale, cioè aumentare la concentrazione di U235, l'isotopo più raro ma più utile alla fissione, dallo 0,7 a circa il 3%, come succede nei reattori ad acqua statunitensi e derivati. Se invece si modifica l'acqua sostituendo

i suoi due atomi d'idrogeno con due atomi di deuterio (un isotopo dell'idrogeno stesso) si ottiene il miglior moderatore noto, che permette di innescare la reazione a catena mantenendo l'uranio allo stato naturale, cioè senza doverlo arricchire, come avviene nei reattori canadesi CANDU.

Esistono poi altri tipi di reattori più avanzati, attualmente in progettazione. Sono i reattori "a spettro veloce", nei quali il nocciolo è immerso nel sodio liquido, e i reattori a letto di sfere (o ciottoli). Questi reattori raggiungono temperature superiori a quelle dei reattori ad acqua, toccando circa i 500°C.

Un prototipo di quest'ultimo tipo attualmente in costruzione in Sud Africa è il reattore "a letto di sfere", che usa l'elio come termovettore di raffreddamento del nocciolo e grafite come moderatore. L'uso di un gas inerte come l'elio permette il raggiungimento di temperature molto alte (dai 700 ai 900°C) e, grazie al pericolo di corrosione praticamente nullo, si riduce anche il rischio di perdita del fluido di raffreddamento.

Il combustibile è costituito da sfere di ceramica (ossido di uranio, capaci di resistere a temperature (750°C) più alte di quelle raggiungibili dai reattori raffreddati ad acqua (350°C). Questo signi-

IL NUCLEARE IN ITALIA

La situazione energetica è oggi particolarmente critica per l'Italia, che dipende pesantemente dalle importazioni, soprattutto per gli idrocarburi. Importiamo poi direttamente oltre il 15% del nostro fabbisogno di elettricità (principalmente dalla Francia). Nel 2002 il consumo annuo, al lordo delle perdite pari a 20,7 TWh (terawattora), è stato di 316,2 TWh, contro una produzione nazionale di 267,7 TWh, corrispondente alla importazione del 15,3% della domanda totale di elettricità.

La situazione sarebbe molto diversa se l'Enel non fosse stata costretta a mettere fuori servizio tutti i suoi impianti nucleari nel 1987, in seguito ad un voto referendario negativo sull'energia nucleare. All'azienda è stato vietato di costruire nuovi impianti nazionali per cinque anni e persino di investire nel settore nucleare all'estero. È però dal 7 Novembre del 1992 che in Italia sarebbe possibile costruire centrali nucleari senza tradire il voto popolare e senza violare la Costituzione. Nel 2004, il Parlamento italiano, considerando che il costo dell'energia in Italia era salito molto di più che nei Paesi confinanti e che l'industria italiana aveva perso le sue qualifiche nel campo nucleare, adottò una legge che annullava il divieto sugli investimenti all'estero e l'Enel poté così ricominciare ad investire nel settore, sebbene solo fuori dall'Italia. Negli anni del bando totale, l'infrastruttura necessaria per mantenere una industria elettronucleare nel nostro Paese è stata in gran parte persa. Ora però l'Enel, attraverso i suoi recenti investimenti e il suo coinvolgimento in progetti di generazione nucleare in Francia e in Slovacchia, spera di riguadagnare almeno in parte l'esperienza di gestione, la capacità imprenditoriale, quella di ricerca, i contatti industriali internazionali e la rete di supporto necessari per un eventuale rilancio futuro del nucleare in Italia. La decisione è saggia, visto che la capacità di gestire in sicurezza e di sostenere impianti nucleari è un tipo di esperienza che si fa presto a perdere ma che richiede un enorme sforzo a livello delle università, della ricerca, della progettazione, dello sviluppo, dell'industria manifatturiera, della regolazione, della sicurezza e della gestione per essere ricostruita.

Proprio in Italia, presso l'Università La Sapienza di Roma e sotto la responsabilità del Prof. Maurizio Cumo, negli ultimi vent'anni è stato sviluppato il progetto di un reattore nucleare ad acqua pressurizzata ad alta temperatura di tipo modulare e dotato di un elevatissimo grado di sicurezza intrinseca che, evidentemente, potrebbe essere considerato anche per il mercato italiano. Il progetto del reattore MARS punta in modo particolare sulla sicurezza intrinseca, intesa come sicurezza basata su leggi ineludibili di natura e non su sistemi di protezione che, per intervenire, abbiano bisogno di sensori e di motori alimentati da energia elettrica (cioè sistemi attivi) e/o dell'intervento di attenti operatori.

Le torri di raffreddamento di questa centrale elettrica a carbone immettono nell'atmosfera vapore acqueo. L'acqua viene fatta bollire bruciando carbone. Il vapore muove i turbogeneratori e all'uscita viene raffreddato fino a condensare, usando una frazione di acqua che evapora, come vediamo.



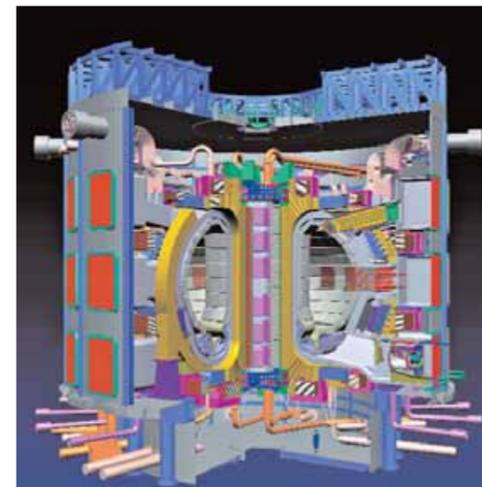
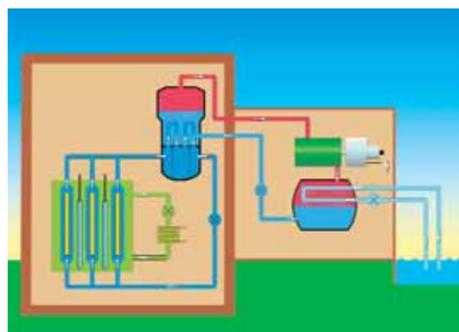
ENERGIA

fica un maggiore rendimento termico pari a circa il 40% rispetto al 35% dei reattori ad acqua pressurizzata. In più, l'uso della grafite come moderatore consente l'aumento dello sfruttamento del materiale fissile, che risulta in meno scorie radioattive per megawatt prodotto. In questi reattori, il moderatore di grafite riveste le sfere di combustibile e ne è dunque parte integrante. Un certo numero di sfere di questo tipo, cioè contenenti ossido di uranio, vengono inserite nel nocciolo del reattore a cui vanno aggiunte sfere di grafite pura (circa un terzo di quelle con l'uranio). Questo tipo di reattore è considerato "naturalmente sicuro" visto che non richiede interventi di sistemi attivi o umani anche per incidenti in cui tutti i sistemi di raffreddamento si fossero persi. Una fusione del combustibile non è possibile.

LA FUSIONE NUCLEARE

Con la sua famosa equazione $E=mc^2$ Albert Einstein aveva gettato le fondamenta per la scoperta di una sorgente di energia letteralmente stellare.

La più famosa equazione di Einstein stabiliva che l'energia (E) è uguale alla massa trasformata (m) per il quadrato della veloci-



Disegno realizzato al computer dello spaccato del reattore Tokamak del progetto internazionale ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). La parola ITER è stata scelta anche perché in latino significa "cammino". E il cammino dell'ITER, iniziato negli anni '80, è ancora molto lontano dal concludersi.

tà della luce (c). Facendone uso, gli scienziati del ventesimo secolo determinarono, tra l'altro, che la fusione nucleare è la fonte dell'energia del Sole e delle altre stelle e che le forze gravitazionali nelle stelle creano le circostanze adatte alla fusione nucleare.

Per iniziare il processo di fusione gli scienziati dovevano quindi trovare un modo di riprodurre le forze gravitazionali che sulle stelle amalgamano le particelle e "accendono" i combustibili. Un passo avanti decisivo si compì negli anni Cinquanta, nell'allora Unione Sovietica, dove si erano realizzati alcuni dei progressi più importanti nel campo della fusione. Gli scienziati sovietici I.E. Tamm e A.D. Sakharov avevano creato una macchina magnetica a forma di ciambella vuota chiamata "Tokamak" (dalle parole russe: toroid-kamera-magnit-katushka), capace di contenere le particelle di combustibile e di innalzarne la temperatura fino allo stato di plasma, cioè un volume di ioni ed elettroni liberi, che potessero es-

sere contenuti e guidati da campi magnetici esterni.

All'interno del Tokamak le temperature salgono al di sopra di 100 milioni di gradi Celsius. **La fusione avviene solo sotto condizioni molto precise e appena queste deviano da quelle richieste il processo si ferma spontaneamente. Questo fatto, lungi dall'essere considerato un handicap, è una delle condizioni di sicurezza del sistema. Se uno dei parametri essenziali andasse fuori campo, la fusione semplicemente cesserebbe da sola.** All'epoca della crisi del petrolio degli anni Settanta, un Tokamak fu costruito all'Università di Princeton (nel 1976), che divenne il centro di riferimento della ricerca mondiale sulla fusione. Altri Tokamak furono costruiti in Russia e in Giappone. Nel 1978 il JET (Joint European Torus) divenne la macchina a fusione più grande al mondo, che spianò la strada al progetto internazionale ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Nel frattempo, Princeton produsse un record di 10 megawatt di potenza, ottenuti

Reattore nucleare moderato ad acqua pesante, al cui schema si rifanno anche i CANDU di cui si parla nel testo. In questo disegno le barre gialle sono il combustibile, immerso nel verde dell'acqua pesante (nella quale l'idrogeno è stato sostituito con deuterio). L'acqua pesante in pressione viene raffreddata in uno scambiatore di calore che viene usato per produrre vapore (rosso). Il vapore aziona il turbogeneratore a destra (verde e grigio) e alla sua uscita viene raffreddato per farlo condensare e reimmettere l'acqua pesante nel circuito.

LA SICUREZZA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI

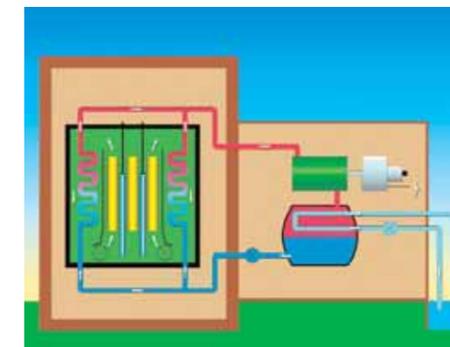
Per capire gli elementi chiave della sicurezza nelle centrali nucleari, ci siamo rivolti all'Ingegnere Massimo Bonechi, che ha un'esperienza trentennale nel campo della progettazione e sicurezza nucleare, sviluppata in Italia e in Canada. Attualmente l'Ing. Bonechi dirige la progettazione del nocciolo e delle analisi di sicurezza di un reattore di tipo avanzato in una società di ingegneria e ricerca nucleare in Canada.

Ecco cosa ci ha risposto: «La sicurezza nucleare consiste nel dotare gli impianti di tutti quei sistemi e misure che permettono il loro funzionamento con il massimo livello di protezione della salute del pubblico. Vale la pena precisare che sicurezza non vuol dire rendere zero la probabilità di incidenti: non esiste alcuna tecnologia che abbia rischio assolutamente zero. L'obiettivo della sicurezza nucleare è piuttosto di rendere il rischio derivante dall'esercizio degli impianti nucleari estremamente basso e molto inferiore a quello di altre attività industriali. Per dare un'idea di come sia minimo il pericolo derivante dalle centrali nucleari, si stima che il rischio per una persona residente vicino ad un impianto nucleare è 25 volte inferiore a quello di essere colpiti da un fulmine e 12.000 volte inferiore al rischio da incidente automobilistico (Nuclear Energy Institute, Stati Uniti).

La sicurezza nucleare si basa su un approccio chiamato "difesa in profondità" che consiste nel fornire successive linee di difesa capaci di proteggere da potenziali incidenti le popolazioni che vivono nelle vicinanze dell'impianto. La prima linea di difesa è la prevenzione, realizzata mediante l'applicazione di alti standard di qualità ed affidabilità a livello di progettazione, costruzione ed esercizio dell'impianto. La seconda linea consiste nel prevedere tutta la gamma di potenziali incidenti e predisporre sistemi che permettano di proteggere il nocciolo del reattore. La terza linea ha lo scopo di limitare le conseguenze radiologiche di incidenti mediante l'uso di speciali barriere fisiche capaci di mantenere le fughe di radioattività al di sotto di valori che assicurino la salvaguardia della salute del pubblico. Una quarta linea di difesa è realizzata mediante dispositivi e procedure che permettano di mantenere l'integrità del sistema di contenimento anche nell'eventualità, estremamente improbabile, di incidenti severi che conducano al danneggiamento del nocciolo. Infine, l'ultima linea di difesa è la predisposizione di adeguati piani di emergenza nell'area circostante l'impianto, come sistemi di monitoraggio delle radiazioni e piani di evacuazione delle popolazioni.

Vari sono i sistemi che intervengono in caso di incidenti. Vi sono prima di tutto sistemi di arresto della reazione nucleare, che intervengono automaticamente quando parametri fondamentali dell'impianto superano certi valori ammissibili. Questi sistemi si basano sull'uso di materiali capaci di catturare i neutroni sottraendoli così alla reazione di fissione. Tali materiali vengono inseriti nel moderatore del reattore sotto forma di barre solide o di soluzioni liquide. Vi sono inoltre sistemi di raffreddamento di emergenza che permettono di rimuovere dal combustibile nucleare, in caso di guasto dei sistemi normali di raffreddamento, il calore di decadimento generato dai prodotti di fissione, dopo l'arresto della reazione. Poi, vi è un sistema di contenimento capace di trattenere ogni fuga di radioattività in caso di incidenti. Si tratta generalmente di una struttura di cemento armato con annessi dispositivi per assicurarne una elevata capacità di tenuta. La quantità di radioattività che può sfuggire dal sistema di contenimento nell'ambiente è estremamente piccola e molto al di sotto dei limiti accettabili per la sicurezza e salute delle persone che vivono nelle vicinanze dell'impianto».

Reattore raffreddato a gas. Il gas, normalmente elio (verde), raccoglie il calore generato dalla fissione del combustibile (giallo) e lo trasferisce all'acqua che si trasforma in vapore (rosso), azionando così il turbogeneratore. La fissione viene moderata tramite barre in grado di rallentare e riflettere i neutroni (blu), che vengono inserite o estratte per regolare la reazione.



da fusione nel loro reattore, seguito dai 18 megawatt del reattore JET in Europa. Quando verrà costruito, ITER sarà tre volte più alto del reattore JET e produrrà fino a 700 megawatt. La fusione

nucleare promette di risolvere in sicurezza il problema dell'approvvigionamento energetico mondiale. Come per la fissione, il costo iniziale di un impianto di fusione nucleare sarà alto, ma una volta

costruito, il materiale combustibile (virtualmente inesauribile) procurerà un flusso di energia costante a basso costo e privo delle scorie radioattive associate agli impianti a fissione.