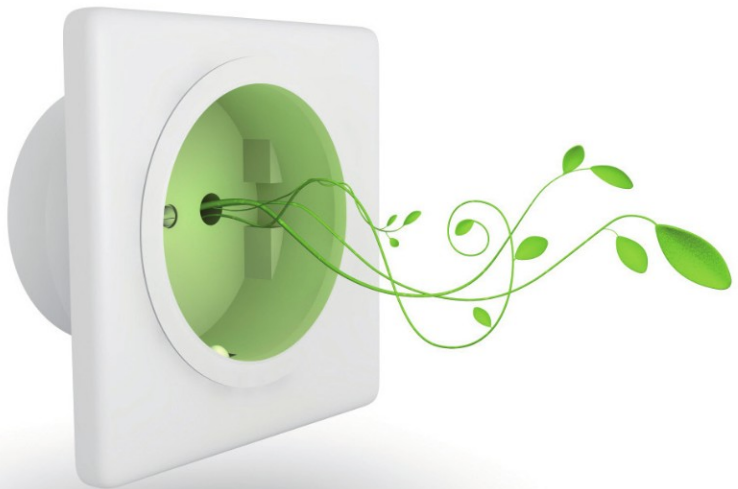


Aldo Bonasera

Quale energia per il futuro?

Tutela ambientale e risorse

*i*blu



 Springer

***i*blu** pagine di scienza

Aldo Bonasera

Quale energia per il futuro?

Tutela ambientale e risorse



Springer

ALDO BONASERA

Laboratori Nazionali del Sud, INFN - Catania;
Cyclotron Institute, Texas A&M University

Collana *i blu* - pagine di scienza ideata e curata da Marina Forlizzi

ISBN 978-88-470-1417-6

e-ISBN 978-88-470-1418-3

DOI 10.1007/978-88-470-1418-3

© Springer-Verlag Italia, Milano 2010

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore, e la sua riproduzione è ammessa solo ed esclusivamente nei limiti stabiliti dalla stessa. Le fotocopie per uso personale possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni per uso non personale e/o oltre il limite del 15% potranno avvenire solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, Corso di Porta Romana n. 108, Milano 20122, e-mail segreteria@aidro.org e sito web www.aidro.org.

Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'utilizzo di illustrazioni e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla registrazione su microfilm o in database, o alla riproduzione in qualsiasi altra forma (stampata o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla legge.

Curatore scientifico e redazione: Folco Claudi

Coordinamento editoriale: Barbara Amorese

Progetto grafico originale della copertina: Simona Colombo, Milano

Rielaborazione grafica: Ikona s.r.l., Milano

Impaginazione: Ikona s.r.l., Milano

Stampa: Grafiche Porpora, Segrate, Milano

Stampato in Italia

Springer-Verlag Italia S.r.l., via Decembrio 28, I-20137 Milano

Springer-Verlag fa parte di Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Ai miei genitori,
come tutti
devo tutto a loro.

Indice

Introduzione	1
Uno sguardo d'insieme	5
L'energia nucleare da fissione	35
Le energie alternative	49
La fusione nucleare	79
Conclusioni	95
Ulteriori letture	99

Introduzione

Nel dicembre del 2008 sono stato invitato a parlare di questioni energetiche in un liceo siciliano. In tale occasione ho notato un grande interesse su questo tema, che influenza fortemente la nostra vita quotidiana. Soprattutto, mi ha colpito la diffusa curiosità nei confronti di una questione cruciale: il nucleare è veramente una buona scelta per il futuro oppure sarebbe meglio trovare vie alternative?

Cercare di dare una risposta a tale quesito mi preme molto, dal momento che lavoro nel campo della fisica nucleare da circa 30 anni: uno dei miei primi studi teorici riguardava proprio la fissione spontanea e nel corso della mia carriera ho avuto occasione di lavorare in diverse parti del mondo, tra cui il Giappone. Questo Paese, come è noto, è soggetto a frequenti terremoti. Questo fatto, già di per sé assai drammatico, è oggetto di ulteriore e comprensibile preoccupazione per la presenza sul territorio di un gran numero di impianti nucleari, uno dei quali si trovava a pochi isolati di distanza dal mio ufficio, nella regione di Tokai. Finora non è mai accaduto nulla di grave, per fortuna, anche perché nel Paese del Sol Levante tutti gli edifici sono costruiti secondo precisi criteri antisismici e le centrali nucleari in particolare sono concepite in modo che un qualsiasi danneggiamento o una modifica del nocciolo del reattore determina il suo automatico spegnimento. Ciononostante, nella città di Kobe gli edifici, i ponti e altre costruzioni non hanno resistito a un recente evento sismico di grande violenza. Ciò non significa che dobbiamo rinunciare al nucleare per la paura dei terremoti o degli attacchi terroristici, ma che rischi di questa natura sono da tenere in debito conto quando si progettano nuove centrali.

Un altro fatto da considerare è che alcuni impianti vengono realizzati a scopo bellico e le recenti vicende che riguardano il braccio di ferro della comunità internazionale con l'Iran ne sono una prova. Come vedremo più in dettaglio successivamente, anche le centrali a uranio naturale consentono di costruire ordigni, come ha dimostrato l'India per prima. Da questo punto di vista l'unica risposta tecnologica consiste nel perseguire la costruzione di reattori di nuova generazione.

Tra i problemi prioritari nel campo della produzione di energia nucleare con gli impianti attuali vi è sicuramente la loro bassissima efficienza: circa il 99 per cento della materia prima viene scartato invece di essere riciclato. Purtroppo alcuni recenti tentativi di ovviare a questo inconveniente non hanno avuto seguito, in primo luogo per motivi economici: scartare il materiale e lasciare il problema delle scorie in eredità ai nostri nipoti è infatti più conveniente che riciclarlo. Così facendo, però, uno sfruttamento intensivo dell'energia nucleare porterebbe in pochi decenni all'esaurimento delle riserve di uranio. Se invece si trovasse il modo di sfruttare almeno al 90 per cento le risorse disponibili di uranio e del più abbondante torio, allora avremmo energia sufficiente per millenni. Da questo punto di vista, la bassa efficienza e la pericolosità di alcuni tipi di centrali porterebbero ad accantonare il nucleare almeno finché non sia disponibile la tecnologia per realizzare nuovi impianti sicuri ed efficienti. La sensazione è che la ricerca non sia lontana da realizzare questi obiettivi.

E a parte il nucleare, in quale direzione si potrebbe andare? L'energia eolica, solare, idroelettrica e geotermica, le cosiddette "alternative" o "rinnovabili", sulla carta sono in grado di soddisfare il nostro fabbisogno attuale e quello futuro, soprattutto se utilizzate in combinazione: è solo una questione di prezzi. In un Paese come l'Italia, situata in una zona molto "calda" dal punto di vista geologico e quindi sfavorita per il nucleare, con un'insolazione notevole e una discreta esposizione ai venti, la soluzione più ragionevole parrebbe proprio il massiccio ricorso alle rinnovabili, da affiancare ovviamente a un progetto per rendere le abitazioni efficienti dal punto di vista termico. Oltre a ciò, potrebbe dare notevoli frutti la realizzazione di centrali geotermiche di nuova generazione.

La ricerca nel campo della fisica ha però un asso nella manica:

in un futuro forse non troppo lontano la soluzione di tutti i problemi energetici potrebbe essere rappresentata dalla fusione nucleare, la fonte energetica delle stelle. Le particelle da cui ricavarla sono in quantità pressoché infinita: rappresentano una parte su 500 dell'acqua del pianeta. Altre risorse abbondanti si trovano sulla Luna e su altri satelliti e pianeti del sistema solare. Queste risorse si potranno utilizzare nella fusione a confinamento magnetico o inerziale, due sistemi in via di sperimentazione in varie parti del mondo. Personalmente mi aspetto che entro alcuni decenni si possa cominciare una transizione lenta e graduale da un'economia basata sul petrolio a quella della fusione. Se questo succederà, occorrerà valutare anche l'opportunità di uno sfruttamento di riserve presenti sulla Luna o eventualmente anche su Marte.

Uno sguardo d'insieme

Le fonti non rinnovabili: petrolio, gas e carbone

Le riserve di petrolio e di altri combustibili fossili del nostro pianeta si sono formate nel corso di milioni di anni: è perciò banale osservare che presto o tardi dovranno esaurirsi. Più difficile, per contro, è prevedere in modo plausibile quando ciò avverrà effettivamente: i calcoli permettono di stimare che, proseguendo al ritmo attuale di sfruttamento di tali risorse, le riserve basteranno ancora per circa 100 anni [1,2]. Gli esperti però sottolineano che il limite reale è dato dalla disponibilità di giacimenti sfruttabili in modo economicamente conveniente e non di quelli individuati con le prospezioni geologiche o le stime teoriche.

Nella figura 1 è riportato il consumo di petrolio giornaliero mondiale, suddiviso per continenti, che nel 2006 si attestava complessivamente a circa 85.000 migliaia di barili al giorno. Un primo dato interessante, ricavabile dal grafico, è il minimo in corrispondenza del 1983, pari a un consumo di circa 60.000 migliaia di barili al giorno. Nell'arco dei successivi 20 anni l'aumento del consumo è stato abbastanza contenuto ed è da attribuire soprattutto ai Paesi dell'Asia, in particolare all'India e alla Cina, che negli ultimi anni hanno conosciuto un tumultuoso sviluppo economico. Da sottolineare poi il forte contributo dell'Occidente industrializzato: quasi un quarto del consumo giornaliero di greggio è a carico degli Stati Uniti, che conta poco più di 305 milioni di abitanti, e un altro quarto scarso all'Europa (circa 500 milioni di abitanti).

Questi dati fanno sorgere immediatamente un interrogativo: l'incremento del consumo indicato giustifica l'aumento del prez-

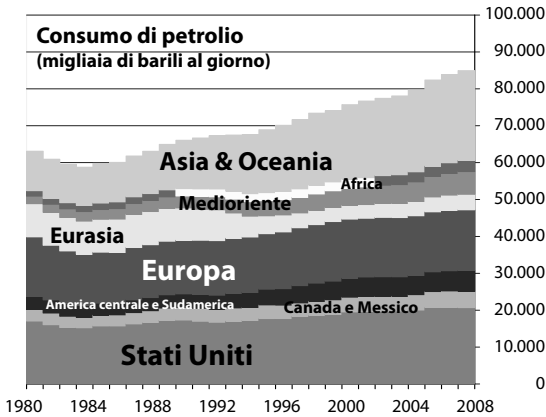


Fig.1 Petrolio "bruciato" al giorno in diverse regioni geografiche (Mod. da [3])

zo del greggio? La risposta è negativa, come mostrato nella figura 2, in cui sono riportati i prezzi del greggio dal 1996 al 2008. Come si vede dal grafico, a fronte di oscillazioni nei prezzi abbastanza contenute fino al 2002, negli anni successivi si è assistito a un aumento del prezzo di circa cinque volte. Osservando poi più da vicino l'andamento recente dei prezzi, si osserva chiaramente un picco seguito da un crollo in corrispondenza dell'ultimo anno, il 2008, in cui è esplosa la crisi finanziaria. Nello stesso periodo, il consumo di petrolio è aumentato del 10 per cento per poi diminuire della stessa percentuale.

Se ne deduce che non vi è correlazione né con l'aumento del consumo né con il paventato pericolo di un prossimo esaurimento delle risorse. E neppure è stata registrata un'improvvisa diminuzione dei costi di estrazione, di distribuzione ecc. Si tratta allora dell'effetto di speculazioni finanziarie?

Il sospetto che vi sia stato qualche fattore esterno a condizionare il tutto nasce dalla considerazione che la dinamica del mercato del petrolio non può essere molto diversa da quella che caratterizza qualunque altra merce. È ragionevole pensare, per esempio, che se si verifica una diminuzione nel consumo delle patate del 10 per cento, allora i prezzi diminuiscano nell'ordine del 10-20 per cento, non certo del 200 per cento, perché a quel punto non converrebbe più coltivare patate.



Fig. 2 Andamento del prezzo del petrolio dal 1996 al 2008.
(Mod da [4])



Fig. 3 Andamento del prezzo del petrolio dal 2005 al 2008
(Mod da [4])

In un mercato così condizionato, a farne le spese sono non solo i privati cittadini, ma anche, in una prospettiva macroeconomica, le nazioni che dipendono da questa importante risorsa.

L'unica iniziativa che potrebbe liberare il mondo da questo giogo consiste in un massiccio investimento nella ricerca che consenta di fare a meno del petrolio, soprattutto in Paesi come l'Italia o il Giappone, che dispongono di risorse fossili molto modeste. Il problema è particolarmente sentito negli Stati Uniti: prova ne sia che nel suo discorso di accettazione della candidatura alla presi-

denza alla *convention* democratica, nell'agosto del 2008, il presidente Barack Obama si è impegnato a eliminare la dipendenza della nazione da fonti energetiche importate entro 10 anni [5].

Le questioni economiche, per quanto importanti, non esauriscono il quadro delle criticità dello sfruttamento dei combustibili fossili. L'altro grande interrogativo sul futuro del nostro pianeta riguarda, come ben noto, l'ambiente e il clima. L'utilizzo dei prodotti petroliferi porta immancabilmente alla liberazione nell'atmosfera di sostanze nocive: basta trovarsi all'aperto in centro in una qualsiasi metropoli all'ora di punta per rendersi conto delle difficoltà di respirazione e della necessità di utilizzare mezzi non inquinanti.

Connesse a queste semplici osservazioni sorgono alcune questioni degne di nota dal punto di vista scientifico. La prima è se il danno provocato dalle attività antropiche si faccia sentire solo a livello locale e in modo temporaneo, o viceversa su una scala più ampia e per lungo tempo. La seconda è se i fenomeni atmosferici osservati negli ultimi anni, gli uragani, la siccità lo scioglimento dei ghiacciai e il presunto aumento della temperatura della Terra, siano da collegare alle attività umane oppure siano da attribuire a cicli della natura. In fondo, argomenta qualcuno, è sufficiente un piccolo aumento nella temperatura del Sole o una tempesta solare per modificare il clima sulla Terra. Periodi di siccità e inondazioni, inoltre, si sono sempre verificati, anche quando l'attività umana era assolutamente insignificante, come documentato già nei testi antichi o riportato da miti e leggende. Peraltro, la Terra è così grande confrontata all'uomo o alla più grande delle città per poter pensare che siamo in grado di modificarne le proprietà.

Stime molto semplici danno un'idea dell'"influenza" che le attività umane possono avere sull'ambiente e la variazione delle temperature. La massa dell'aria atmosferica è infatti dell'ordine di 10^{18} chilogrammi (un miliardo di miliardi), mentre la massa di petrolio consumata in un anno è dell'ordine di 10^{15} chilogrammi (un milione di miliardi), cioè 1.000 volte inferiore. Le cose non cambiano di molto aggiungendo alla stima il carbone, il gas e gli altri combustibili inquinanti.

Non è detto però che il confronto delle masse sia l'unico elemento significativo, soprattutto in un sistema complesso e caotico qual è l'atmosfera terrestre. Calcoli approssimati portano a sti-

mare in circa un grado l'aumento medio della temperatura dell'atmosfera a causa del petrolio consumato in un anno, anche se occorre considerare che lo sfruttamento dei combustibili fossili non è certo uniforme sulla superficie terrestre: le zone industrializzate della Terra, in buona sostanza, "bruciano" di più.

Guardando avanti, è possibile prevedere che, procedendo ai ritmi attuali di consumo, nei prossimi 200 anni verranno immessi in atmosfera i prodotti di combustione di circa 10^{18} chilogrammi di petrolio. Si tratta di un valore molto elevato e non trascurabile rispetto alla massa d'aria presente sul nostro pianeta. Supponendo di bruciare tutte le riserve di petrolio disponibili in un solo anno, si avrebbe un aumento della temperatura della Terra di diversi gradi.

Queste stime, anche se molto grossolane per le approssimazioni fatte, suggeriscono come le variazioni, sebbene trascurabili globalmente, possano essere considerevoli a livello locale, poiché le perturbazioni repentine sono molto più pericolose di un aumento medio e graduale della temperatura. Si può facilmente comprendere come, bruciando una grande quantità di combustibile in un'area limitata, si possa verificare una variazione della temperatura su scala locale che tenderà a propagarsi nelle zone circostanti. Gli effetti di questa perturbazione, tuttavia, sono difficilmente stimabili poiché le leggi che governano la dinamica dell'atmosfera sono caotiche.

Alla domanda se l'uomo stia danneggiando l'ambiente in modo permanente con l'utilizzo di oli combustibili, la risposta è fortunatamente negativa. È possibile che localmente gli effetti si facciano sentire anche in modo drammatico, ma, una volta venuta meno la perturbazione, la situazione dovrebbe ritornare alla normalità trascorso un certo lasso di tempo.

L'aumento globale della temperatura osservata negli ultimi decenni, in definitiva, può essere imputata, almeno in parte, alle attività umane: su questo dato vi è ormai un accordo pressoché unanime della comunità scientifica, in particolare dei climatologi. Ciò sprona a intraprendere un'azione congiunta per tenere il fenomeno sotto controllo e, se possibile, per diminuire gli effetti negativi: questa iniziativa non può che passare per una diminuzione del consumo energetico da fonti fossili a livello mondiale.

L'energia nucleare da fissione

Le considerazioni di carattere economico e ambientale fatte fin qui per il petrolio possono essere ripetute per l'energia nucleare ottenuta dal processo di fissione, che attualmente copre all'incirca il 10 per cento del fabbisogno mondiale di energia elettrica, e per la sua materia prima: l'uranio. Quest'ultimo, com'è noto, è l'elemento 92 della tavola periodica e viene estratto, in forma di ossido, dalle miniere in varie parti del mondo.

Si stima che attualmente rimangano riserve per circa sei milioni di tonnellate, che equivalgono, al ritmo attuale di sfruttamento nelle centrali, a risorse sufficienti ancora per 100 anni circa (Tabella 1). Com'è avvenuto per il petrolio, l'uranio ha subito recentemente una forte riduzione di prezzo: si è passati dai circa 160 dollari al chilogrammo dell'inizio del 2008 ai circa 90 dollari al chilogrammo dei primi mesi del 2009.

Tab. 1 Riserve di uranio nelle diverse nazioni del mondo

Nazione	riserve (tonn.)	% sul totale	Nazione	riserve (tonn.)	% sul totale
Australia	1.243.000	23	Ucraina	200.000	4
Kazakhstan	817.000	15	Giordania	112.000	2
Russia	546.000	10	Uzbekistan	111.000	2
Sudafrica	435.000	8	India	73.000	1
Canada	423.000	8	Cina	68.000	1
Stati Uniti	342.000	6	Mongolia	62.000	1
Brasile	278.000	5	Altri	210.000	4
Namibia	275.000	5			
Niger	274.000	5			
			Totale mondiale	5.469.000	100

(Mod da [6])

Uno strano calcolo che si è soliti fare nel caso dell'uranio riguarda l'entità delle emissioni "risparmiate" grazie alle centrali nucleari: si stima che nell'arco di un anno *non* vengano immessi in atmosfera circa tre miliardi di chilogrammi di sostanze nocive – in primo luogo CO₂ – altrimenti liberate da centrali a combustibili fossili (a carbone, per esempio) a parità di energia prodotta. Da questo punto di vista, pertanto, le centrali nucleari si possono classificare tra quelle "pulite".

Dal punto di vista chimico-fisico, l'uranio che si trova in natura è per la maggior parte l'isotopo 238 (simbolo ^{238}U o U-238), ma il combustibile utilizzabile per le centrali è l'isotopo radioattivo 235 (U-235) che costituisce lo 0,7 per cento di tutto l'uranio naturale. Ciò significa che, su un totale di circa 6 milioni di tonnellate di uranio, solamente 42.000 tonnellate sono di U-235 e che per ogni chilogrammo di uranio utilizzato solo 7 grammi circa fissionano effettivamente, mentre i rimanenti 993 grammi non vengono bruciati e costituiscono le scorie radioattive. Detto in altri termini, l'efficienza delle centrali nucleari attuali è al di sotto dell'1 per cento.

L'inconveniente principale dello sfruttamento dell'energia nucleare è dato dal fatto che, come ben noto, le scorie sono radioattive per migliaia o milioni di anni, e per la loro elevata nocività devono essere smaltite in modo sicuro.

Negli Stati Uniti, per esempio, fino a che il presidente Barack Obama non ha bloccato il progetto, era previsto un investimento di circa 10 miliardi di dollari per la costruzione di un sito di stoccaggio a lungo termine per circa 70.000 tonnellate di scorie a Yucca Mountain, nel deserto del Nevada [7]. I costi di stoccaggio dovrebbero anche essere tenuti in debito conto quando si progetta la costruzione di nuove centrali anche se i proponenti spesso "dimenticano" di farlo.

Il problema delle scorie può essere attenuato, tuttavia, riciclando questo materiale quasi interamente e riutilizzandolo nelle centrali di nuova generazione. Il processo estende il tempo di esaurimento delle risorse naturali da 100 a circa 5.000 anni, rendendo questa risorsa ancora più conveniente e lasciando un tempo assai lungo per risolvere il problema dello smaltimento. L'inconveniente principale, in questo caso, è che la tecnologia per l'utilizzo di materiale riciclato nelle centrali non è ancora matura.

Se oltre all'utilizzare il 100 per cento dell'uranio, le centrali del futuro saranno in grado di funzionare anche con il torio, elemento molto abbondante sulla Terra, le nostre risorse aumenterebbero di circa sei volte e il nucleare potrebbe fornire energia elettrica al ritmo attuale per circa 30.000 anni.

Accanto a queste considerazioni di carattere generale, prima di investire nel nucleare occorre valutare le questioni economiche e quelle riguardanti la sicurezza. Un prospetto dei nuovi progetti di impianti nucleari nel mondo è riportato in tabella 2.

Tab.2 Centrali nucleari nel mondo

Nazione	Operative (potenza erogata, in MW)	In costruzione all'1/2/2010 (potenza erogata, in MW)	Previste all'1/2/2010 (potenza erogata, in MW)
Argentina	2 (935)	1 (692)	2 (767)
Armenia	1 (376)	0	1 (1.060)
Bielorussia	0	0	2 (2.000)
Belgio	7 (5.728)	0	0
Brasile	2 (1.901)	0	1 (1.245)
Bulgaria	2 (1.906)	0	2 (1.900)
Canada	18 (12.652)	2 (1.500)	4 (4.400)
Cina	11 (8.587)	20 (21.880)	37 (41.590)
Corea del Nord	0	0	1 (950)
Corea del Sud	20 (17.716)	6 (6.700)	6 (8.190)
Egitto	0	0	1 (1.000)
Emirati Arabi	0	0	4 (5.600)
Finlandia	4 (2.696)	1 (1.600)	0
Francia	58 (63.236)	1 (1.630)	1 (1.630)
Germania	17 (20.339)	0	0
Giappone	54 (47.102)	1 (1.373)	13 (17.915)
India	18 (3.981)	5 (2.774)	23 (21.500)
Indonesia	0	0	2 (2.000)
Iran	0	1 (915)	2 (1.900)
Kazakhstan	0	0	2 (600)
Messico	2 (1.310)	0	0
Paesi Bassi	1 (485)	0	0
Pakistan	2 (400)	1 (300)	2 (600)
Regno Unito	19 (11.035)	0	4 (6.600)
Rep. Ceca	6 (3.686)	0	0
Romania	2 (1.310)	0	2 (1.310)
Russia	31 (21.821)	9 (7.130)	8 (8.000)
Slovacchia	4 (1.760)	2 (840)	0
Slovenia	1 (696)	0	0
Sudafrica	2 (1.842)	0	3 (3.565)
Spagna	8 (7.448)	0	0
Stati Uniti	104 (101.119)	1 (1.180)	11 (13.800)
Svezia	10 (9.399)	0	0
Svizzera	5 (3.252)	0	0
Tailandia	0	0	2 (2.000)
Turchia	0	0	2 (2.400)
Ucraina	15 (13.168)	0	2 (1.900)
Ungheria	4 (1.880)	0	0
Vietnam	0	0	2 (2.000)
Totale	436 (372.693)	53 (51.114)	142 (156.422)

(Mod da [8])

Come si può vedere dai dati riportati, a fronte di 436 impianti in funzione nel mondo, molti dei quali prossimi al termine della vita operativa, se ne stanno costruendo 53 e progettando 142, la mag-

gior parte nei Paesi in via di sviluppo o nei giganti asiatici Cina e India.

Quando si parla di costruire nuovi impianti torna alla mente il nome tristemente famoso di Chernobyl, in Ucraina, dove il 26 aprile del 1986 si verificò il più grave incidente nucleare della storia. Occorre tuttavia sottolineare che le centrali moderne hanno a che vedere con quella di Chernobyl quanto un'automobile moderna con una degli anni Sessanta, anche se ciò, ovviamente, non mette al riparo in modo assoluto da rischio di eventi catastrofici.

Il problema dello smaltimento delle scorie e quello della sicurezza sono legati, anche se indirettamente, al costo finale dell'elettricità, che deve giocoforza comprendere, oltre ai normali costi di gestione e di manutenzione, anche quelli della costruzione degli impianti e quelli previsti per la loro dismissione.

Per la costruzione di una centrale nucleare standard, cioè con tecnologia già matura, occorrono circa 10 anni, mentre nel caso di un nuovo progetto i tempi necessariamente si allungano. Anche per quanto riguarda la longevità di una centrale le differenze possono essere evidenti: quelle attuali possono rimanere operative per circa 40 anni, ma ci si attende che in futuro tale arco di tempo possa arrivare a 60 anni. Ciò è dovuto al limite intrinseco di durata in efficienza dei reattori che, come ogni altra realizzazione tecnologica, vanno incontro a un deterioramento, in questo caso per accumulo di radioattività e corrosione, che rendono più frequenti i piccoli incidenti.

Una volta terminata l'attività della centrale, si apre una complessa fase di dismissione dell'impianto – o *decommissioning*, in inglese – che deve comprendere un'attenta azione di bonifica ambientale, dal momento che una dispersione di materiale radioattivo può rendere inabitabili vaste aree per diversi secoli: i materiali pericolosi devono essere trasportati in luoghi sicuri e la "pulizia" del reattore può richiedere più di 30 anni.

In questo ambito non esiste tuttavia un'esperienza consolidata perché i reattori più vecchi sono attualmente in funzione. L'Italia è un caso un po' particolare perché le quattro centrali italiane – Latina, Sessa Aurunca (Ce), Trino Vercellese (Vc) e Caorso (Pc) – sono state chiuse in seguito al referendum del 1987, dopo l'incidente di Chernobyl.

Sull'argomento, tuttavia, non sono disponibili molte informazioni e c'è il sospetto che sopra queste centrali cresceranno mon-

tagne di terra e cemento per seppellire definitivamente il problema. Per inciso, ci si domanda se tale soluzione, per quanto approssimativa, non sia la più auspicabile, considerati i rischi connessi allo smantellamento delle varie parti dell'impianto e al trasporto delle scorie verso un sito adatto allo stoccaggio a lungo termine, senza contare il tempo necessario per l'operazione e la montagna di denaro richiesta, che può facilmente rappresentare il terreno per speculazioni.

Un caso esemplare è quello che riguarda la centrale nucleare di Shoreham, a Long Island, nello Stato di New York (Stati Uniti) dismessa senza mai essere entrata veramente in funzione. La sua costruzione fu annunciata a metà degli anni Sessanta per un costo di circa 70 milioni di dollari con entrata in funzione prevista per il 1973 [9]. Costi e tempi aumentarono a causa dell'opposizione della popolazione anche in seguito alla forte impressione causata dall'incidente della centrale di Three Mile Island del 1979 (Fig 4), il più grave mai avvenuto negli Stati Uniti.



Fig. 4 Veduta aerea della centrale di Three Mile Island, teatro, nel 1979, di un grave incidente (Foto: Public Health Image Library)

Il timore, nel caso di Shoreham, era che, a causa dell'alta densità di popolazione, sarebbero sorti problemi di evacuazione in caso di allarme. Alla fine degli anni Settanta, il costo era salito a 2 miliardi di dollari. La centrale fu definitivamente "decommissionata" nel 1986 senza aver mai prodotto realmente energia elettrica.

Il prezzo finale di 6 miliardi di dollari fu a carico dei contribuenti.

Il costo della dismissione, avvenuta nel 1995, è stato di circa 186 milioni di dollari, di cui circa 50 milioni solo per trasferire il combustibile nucleare in un altro impianto. Queste cifre sono significative ma si riferiscono a una centrale praticamente mai utilizzata e non in stato di abbandono. Centrali più vecchie e con alle spalle anni di utilizzo necessitano naturalmente di maggiori precauzioni e molti materiali, come quelli delle turbine, non possono essere riutilizzati come fu fatto per la centrale di Shoreham.

In conclusione, i fatti da tenere in considerazione prima di intraprendere la via del nucleare sono i seguenti:

- le centrali dovrebbero essere virtuose, cioè riciclare il materiale radioattivo in modo da estendere le risorse di uranio, diminuire il problema scorie ed evitare il pericolo di proliferazione o altro uso "improprio", come discuteremo più in dettaglio in seguito;
- occorre finanziare la ricerca sulle centrali di nuova generazione, poiché le centrali "virtuose" non sono ancora disponibili;
- i cittadini dovrebbero essere coinvolti nelle decisioni che riguardano la scelta dei siti delle centrali e dei depositi delle scorie per evitare il ripetersi di casi come quello di Shoreham.

Il futuro nucleare dell'Italia

Nel febbraio del 2009, il governo Italiano ha siglato un Protocollo d'intesa con la presidenza della Repubblica francese che prevede la costruzione di quattro nuovi reattori a fissione sul nostro territorio, riaprendo di fatto la stagione nucleare che si era conclusa con il referendum dopo il grave incidente di Chernobyl. Secondo quanto dichiarato, in 10-20 anni i nuovi impianti dovrebbero fornire circa il 10 per cento della produzione di energia elettrica nazionale, riducendo così la nostra dipendenza dal petrolio importato e le nostre emissioni di CO₂ per avvicinarci ai limiti imposti dal protocollo di Kyoto.

L'investimento iniziale per ciascun impianto si aggirerebbe attorno ai cinque miliardi di euro, anche se non sono stati forniti dati ufficiali. Come visto in precedenza si tratta di costi solo teorici, che quasi certamente andrebbero incontro a un notevole incremento, come dimostrato dalle esperienze statunitensi e francesi.

Per valutare se si tratti di una forma conveniente di energia, occor-

re sottolineare che la scelta è caduta sulla tecnologia *EPR (European Pressurized Reactor o Evolutionary Power Reactor)* altrimenti definita “di Terza generazione”, che utilizza uranio arricchito come combustibile e acqua naturale per il raffreddamento del nocciolo e per la moderazione dei neutroni: per gli impianti di questo tipo valgono tutte le considerazioni di sicurezza e di convenienza economica fatte nelle pagine precedenti. In termini generali, in ogni caso, sembra che l'Italia sia intenzionata ad abbracciare la filosofia “usa e getta” che rimanda ai nostri nipoti la soluzione del problema della dismissione delle centrali e quello dello smaltimento delle scorie radioattive, trascurando la tecnologia *CANDU*, di cui parleremo diffusamente nel secondo capitolo, che allo stato attuale appare come la più efficiente e sicura [10].

A più di 20 anni dalla scelta di abbandonare l'energia nucleare, se tutto va come previsto da questo nuovo accordo internazionale, il nostro Paese si troverà ad affrontare nuovamente i rischi connessi con la presenza di centrali sul nostro territorio. Se è pur vero che gli impianti di nuova generazione non sono paragonabili a quelli costruiti alcuni decenni fa, permane un non trascurabile fattore di rischio, semplicemente per il fatto che non esiste opera dell'uomo che non presenti, o prima o poi, qualche inconveniente.

A complicare ulteriormente la faccenda vi è il fatto che l'Italia è caratterizzata da un territorio del tutto particolare, occupato per il 35,2 per cento della sua superficie da montagne, per il 41,6 per cento da colline e solo per il restante 23,2 per cento da zone pianeggianti. Oltre a ciò, la superficie complessiva del nostro Paese è abbastanza limitata in rapporto al numero di cittadini: l'Italia è infatti al 39° posto nel mondo per densità di popolazione con 197 abitanti per km². La Francia, per confronto, è al 68° posto con 111 abitanti per km² mentre la Russia si piazza in fondo alla classifica con una densità di popolazione inferiore ai 9 abitanti per km².

Questo dato è molto importante quando bisogna decidere se e dove costruire una centrale nucleare. Una zona a bassa densità di popolazione è chiaramente preferibile in caso di incidente: si pensi per un attimo a che cosa sarebbe potuto succedere nei dintorni di Chernobyl e nell'intera Ucraina se la centrale fosse stata meno isolata. D'altra parte una bassa densità implica anche un minor bisogno d'energia: le centrali, in definitiva, servono di più dove la densità è maggiore e soprattutto dove vi sono più industrie. Perciò si comprende facilmente che in Italia le centrali dovrebbero essere concentrate al Nord, mentre le

scorie potrebbero essere stivate in zone meno popolate in qualche miniera di sale abbandonata. Con l'attuale tecnologia, infatti, costruire le centrali al Sud per poi trasportare l'energia al Nord significherebbe dissipare almeno un terzo dell'energia elettrica nella rete, a meno di non utilizzare localmente il nucleare per soddisfare tutto il fabbisogno energetico della zona e utilizzare le centrali a gas, a petrolio o altro al Nord, il che però comporterebbe un probabile, sostanziale aumento dell'inquinamento, già peraltro su livelli allarmanti.

A tutto ciò occorre aggiungere che il rischio d'incidente dipende almeno in parte dal rischio di eventi naturali di una certa gravità: in questo non aiuta il fatto che l'Italia sia un Paese caratterizzato da un rischio sismico assai elevato in molte sue regioni, senza contare il rischio idrogeologico, che periodicamente fa sentire la propria presenza in modo tragico.

Le precedenti considerazioni fanno convergere tutte le ipotesi di collocamento delle centrali sulla Pianura Padana, dove maggiore è la richiesta di energia elettrica e minore è il rischio geologico di terremoti, mentre le scorie potrebbero essere stivate anche al Sud, correndo però il rischio di incidenti durante il trasporto su distanze così elevate.

Un altro problema da affrontare nel nostro Paese è sicuramente quello dell'opposizione delle popolazioni che vivono nei pressi dei siti prescelti, secondo una logica che in lingua inglese viene definita *not in my backyard* ("non nel mio cortile"). Si tratta in sostanza di un meccanismo psicologico piuttosto comune, che fa sì che anche le persone favorevoli in termini generali ad affrontare una scelta che comporta alcuni inconvenienti o rischi siano molto meno disposte ad accettarli quando sono toccate in prima persona.

Un'altra opzione valida sarebbe di proporre che le nuove centrali siano costruite sul territorio della Francia che, come ricordato, ha una densità di popolazione molto più bassa, è già attrezzata per il trattamento delle scorie e confina con le regioni italiane più industrializzate. Peraltro, Oltralpe 2-3 centrali aggiuntive aumenterebbero il numero complessivo di impianti sul territorio di non più del 5 per cento. Naturalmente per la Francia l'operazione comporterebbe un notevole ritorno economico, con interessanti ricadute sulla creazione di nuovi posti di lavoro.

La costruzione di centrali a uso italiano sul suolo straniero è solo un'ipotesi, ma meno lontana dalla realtà di quanto possa sembrare di

primo acchito. Parte del fabbisogno di energia elettrica del nostro Paese, infatti, viene soddisfatto con la produzione nucleare di Paesi esteri quali la Francia e la Slovenia. Inoltre, l'ENEL è comproprietaria di alcuni impianti di produzione fuori dei confini nazionali, e lo stesso accordo Italia-Francia del febbraio 2009 prevede la costruzione di una centrale EPR sul suolo francese con una partecipazione al 12,5 per cento della stessa ENEL.

Se le difficoltà incontrate nell'attuazione del programma sul territorio italiano dovessero essere di difficile soluzione, il potere politico potrebbe essere indotto a proseguire sulla strada dell'importazione dell'energia dall'estero, con una partecipazione diretta solo sul piano delle competenze tecnologiche. Basti ricordare che nel 2003 la strenua opposizione delle popolazioni locali allo stoccaggio di scorie nucleari nel sito unico di Scanzano, in Basilicata, indusse il governo italiano a cercare una soluzione alternativa, individuata nell'affidamento del materiale radioattivo a società estere. Lo stesso braccio di ferro tra politica e cittadini potrebbe ripetersi, così come la scelta di comodo.

Le energie alternative

Per "energie alternative" si intende in generale l'insieme delle fonti energetiche diverse dai combustibili fossili e dall'energia nucleare; tale denominazione è considerata quasi universalmente sinonimo di "energie rinnovabili", che comprendono quelle fonti che si rigenerano, e sono così perpetuamente disponibili, come il vento e i corsi d'acqua, o che è prevedibile che non si esauriranno su scale temporali umane.

Storicamente, le fonti alternative sono anche state le prime a essere sfruttate per generare energia cinetica adatta a diversi lavori, altrimenti svolti con la forza muscolare umana o animale: si pensi che i primi mulini a vento vengono fatti risalire al 3000 avanti Cristo e che l'invenzione di quelli ad acqua è attribuita ai Sumeri.

Lo sfruttamento delle stesse fonti per generale elettricità è ovviamente un'acquisizione ben più recente, per non parlare dell'energia solare, del geotermico, delle biomasse e dei rifiuti che necessitano di una tecnologia piuttosto sofisticata.

Per quanto siano "verdi", anche le fonti alternative devono soddisfare alcuni criteri economici: il primo, ovviamente, è rappresentato

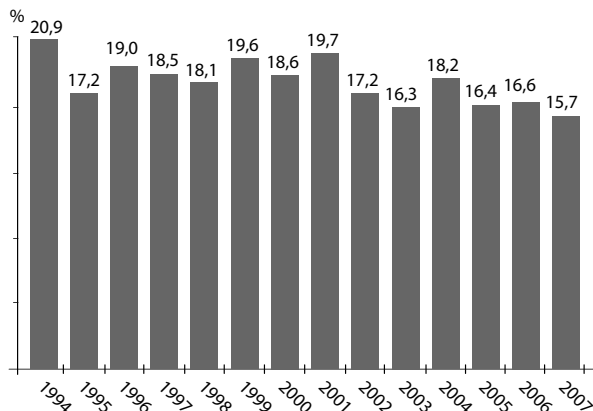


Fig. 5 Andamento del rapporto produzione da fonte rinnovabile/produzione totale in Italia dal 1994 al 2007 (Mod. da [11])

dal costo per chilowattora, mentre il secondo è la quantità d'energia che si può produrre in base alle risorse disponibili. Negli ultimi decenni, lo sviluppo delle fonti alternative è stato notevole, e per questo sono disponibili dati attendibili.

Come si evince dalla figura 5, la quota della produzione di energia elettrica attribuibile alle fonti rinnovabili in Italia si è attestata negli ultimi anni attorno al 16 per cento. Nel periodo dal 1994 al 2007 tale percentuale è diminuita, principalmente a causa di un aumento di produzione di energia utilizzando fonti non rinnovabili.

Il dettaglio della produzione di energia per le varie regioni d'Italia è riportato in tabella 3: il nostro Paese è un caso interessante per la sua posizione geografica e per le risorse naturali di cui dispone, dal mare ai vulcani. L'energia da fonte geotermica è utilizzata soltanto in Toscana, regione che può vantare il primato del primo sfruttamento della storia di questa fonte energetica. Considerata l'abbondanza di vulcani sul territorio italiano, si tratta evidentemente di una risorsa sottoutilizzata.

È sorprendente come regioni del Nord, quali il Piemonte, la Lombardia e persino il Trentino Alto Adige producano anche il triplo dell'energia solare rispetto a Sicilia, Sardegna e Calabria. È altresì sorprendente come il contrario accada per l'eolico, dal momento che il Sud produce molta più energia del Nord Italia.

Produzione di elettricità da fonti energetiche rinnovabili nelle regioni italiane nel 2008							
Regione	Ildrica (GWh)	% sul tot.	Eolica (GWh)	%	Solare (GWh)	% sul tot.	Totale
Piemonte	5.654,30	92,99	-	-	11,3	0,19	6.080,80
Valle d'Aosta	2.845,60	99,86	-	-	0,1	0,00	2.849,50
Lombardia	10.504,60	88,33	-	-	20,3	0,17	11.891,80
Trentino AA	9.273,90	99,26	4,2	0,04	19,3	0,21	9.343,40
Veneto	4.162,10	93,46	-	0,00	10,6	0,24	4.453,20
Friuli VG	1.761,10	91,24	-	0,00	5,6	0,29	1.930,10
Liguria	227,8	68,72	17,1	5,16	17,1	5,16	331,5
Emilia Rom.	934,3	50,73	3,2	0,17	17,6	0,96	1.841,80
Toscana	715,1	11,13	36	0,56	13,3	0,21	6.423,70
Umbria	1.072,80	87,57	3,1	0,25	10,2	0,83	1.225,10
Marche	500,7	88,18	-	-	9,8	1,73	567,8
Lazio	898	75,03	13,1	1,09	9,3	0,78	1.196,80
Abruzzo	1.299,00	82,07	243,8	15,40	5,1	0,32	1.582,80
Molise	172,7	36,36	172,5	36,32	0,4	0,08	475
Campania	405,2	27,44	992,9	67,24	6,5	0,44	1.476,70
Puglia	-	-	1.316,90	61,51	23,7	1,11	2.141,00
Basilicata	207,6	40,12	283,8	54,85	1,9	0,37	517,4
Calabria	651,6	41,65	115,2	7,36	8	0,51	1.564,30
Sicilia	70,3	5,86	-	-	1.044	86,96	1.200,50
Sardegna	266,5	24,89	615,6	7,9	7,9	0,74	1.070,60
Italia	41.623,20		3817,4		1242		58.163,80
Regione	Rifiuti (GWh)	% sul tot.	Biomasse e bioliquidi (GWh)	%	Biogas (GWh)	% sul tot.	Totale
Piemonte	13,8	0,23	218,5	3,59	182,8	3,01	6.080,80
Valle d'Aosta	-	-	-	-	3,8	0,13	2.849,50
Lombardia	884,8	7,44	208,6	1,75	273,6	2,30	11.891,80
Trentino AA	11,5	0,12	20,8	0,22	13,7	0,15	9.343,40
Veneto	60,1	1,35	92,1	2,07	128,3	2,88	4.453,20
Friuli VG	49,9	2,59	106,1	5,50	7,6	0,39	1.930,10
Liguria	-	-	-	-	85,3	25,73	331,5
Emilia R	219,7	11,93	372,6	20,23	294,4	15,98	1.841,80
Toscana	40,7	0,63	16	0,25	82,4	1,28	6.423,70
Umbria	-	-	105,3	8,60	33,7	2,75	1.225,10
Marche	7	1,23	-	-	50,4	8,88	567,8
Lazio	110,2	9,21	-	-	166,1	13,88	1.196,80
Abruzzo	-	-	-	-	34,9	2,20	1.582,80
Molise	34,9	7,35	89,9	18,93	4,7	0,99	475
Campania	1,1	0,07	0,1	0,01	70,9	4,80	1.476,70
Puglia	38,5	1,80	695,8	32,50	66	3,08	2.141,00
Basilicata	14,2	2,74	9,9	1,91	-	-	517,4
Calabria	36,5	2,33	742,5	47,47	10,5	0,67	1.564,30
Sicilia	-	-	-	-	75,5	6,29	1.200,50
Sardegna	33,5	3,13	132,4	12,37	14,8	1,38	1.070,60
	1556,4		2810,6		1599,4		58.163,80

Tab. 3 Produzione lorda da fonte rinnovabile in Italia nel 2008 (Mod. da [11])

Per quel che riguarda l'idroelettrico, l'opinione di molti esperti è che esso sia giunto al limite dello sfruttamento, con l'eccezione del mare, mentre per le altre risorse alternative vi sono ancora ampi spazi di crescita. Il Sud Italia, per esempio, potrebbe produrre tanto solare quanto il Nord, viceversa per l'eolico. Un caso eclatante è quello del geotermico, assolutamente poco sfruttato in Italia.

Ma che cosa succede nel resto d'Europa? Come si vede nella figura 6, il Paese che produce più energia rinnovabile è la Germania

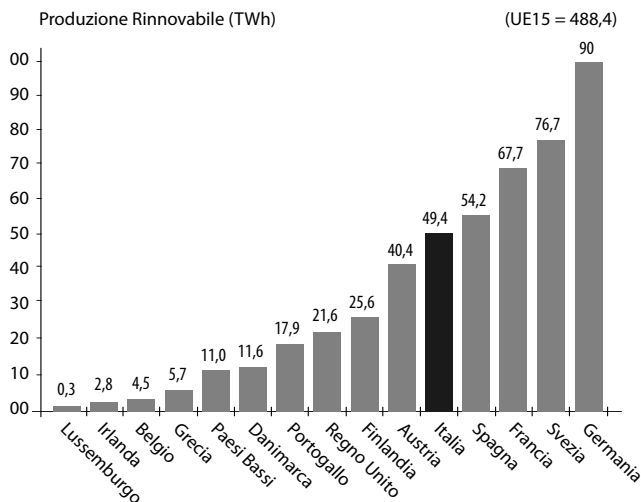


Fig. 6 Produzione di energia (in terawattora) da fonti rinnovabili in vari Paesi europei (Mod. da [12])

con un picco di circa 90 terawattora (un terawattora equivale a 1000 gigawattora). Questo dato, tuttavia, non è molto significativo per comprendere le vere potenzialità delle energie alternative.

Lo stesso dato ma rapportato alla produzione totale d'energia è riportato in figura 7. Quest'ultimo grafico è più significativo poiché mostra chiaramente quanto conta l'energia alternativa rispetto al totale. La Germania, che sembrava detenere il primato per la produzione di energia verde, si attesta attorno al 16 per cento della produzione totale assieme all'Italia. Dati molto più significativi sono, rispettivamente, quello dell'Austria e quello della Svezia che soddisfano più della metà del proprio fabbisogno grazie all'e-

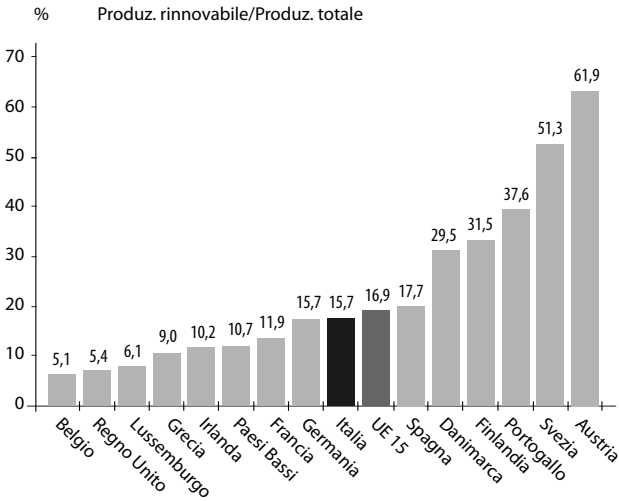


Fig.7 Percentuale della produzione rinnovabile sul totale in vari Paesi europei (Mod. da [12])

nergia rinnovabile. Lo stesso si può dire per la quota del 12 per cento della Francia, tenuto conto che si tratta del Paese con la maggiore produzione di energia nucleare. La prima conseguenza importante di ciò è che il rinnovabile può soddisfare i bisogni energetici dei diversi Paesi per una quota assai cospicua, intorno al 60 per cento, se si guarda al dato austriaco, un valore che potrebbe essere raggiunto anche da nazioni quali la Germania e l'Italia. Nel nostro caso, in particolare, tale valore potrebbe essere addirittura superato sfruttando adeguatamente l'energia del mare o dei vulcani, risorse non presenti in Austria.

L'interesse per le energie alternative è cresciuto con il passare degli anni anche in Paesi non europei. Particolarmente interessante, e forse sorprendente, è il dato della Cina che pur non ha dimostrato negli anni recenti una particolare "virtuosità" ambientale. Eppure il gigante asiatico è stato teatro, a partire dal 2006, di un'improvvisa crescita dell'energia eolica [13]. Il dato può essere interpretato non tanto come il frutto di un particolare riguardo per l'ambiente da parte dei cinesi, quanto in realtà come l'effetto di un interesse economico. Basti considerare il numero di industrie che in Cina producono turbine e altro materiale per sfruttare l'eo-

lico: esso è passato dalle quattro, esistenti nel 2004, alle 70 alla fine del 2008. A tale riguardo ci si attende che, per effetto di una semplice legge di economia di scala, a questa crescita della produzione corrisponda una diminuzione dei prezzi delle centrali eoliche. La situazione sarà ancora più interessante quando l'India e altri grandi Paesi emergenti si affacceranno su questo mercato.

Virtuosità dell'Austria e stime di crescita della produzione di energia pulita

Dopo aver discusso le varie potenzialità delle diverse fonti energetiche, dal petrolio alle energie alternative passando per il nucleare, la domanda rilevante è la seguente: ma quanto costa? Si è visto come sia il nucleare sia i combustibili fossili possano soddisfare i nostri bisogni per almeno 100 anni con le tecnologie e il tipo di utilizzo attuali, e come le energie alternative, se opportunamente diversificate, possano soddisfare una buona percentuale dei bisogni di una nazione in modo continuativo. Si è accennato altresì alle possibilità di sviluppo nei vari campi, sia per il nucleare, con centrali di nuova concezione poco inquinanti, sia per le fonti alternative con l'entrata nel mercato di nuovi soggetti e investimenti che porteranno a una diminuzione dei prezzi e a una maggiore efficienza.

Per avere importanti indicazioni su quali investimenti siano convenienti nell'immediato è possibile considerare il costo attuale dell'energia sul mercato europeo, riportato in figura 8.

Il grafico fornisce interessanti informazioni non solo sull'andamento dei prezzi ma anche sulla "qualità" della vita in diversi Paesi. Per esempio, la Danimarca ha un prezzo per chilowattora tra i più alti in Europa e la differenza con il prezzo tasse escluse è rilevante: produrre energia costa relativamente poco e ciò consente allo stato scandinavo di mantenere uno stato sociale molto attivo ed efficiente. Se si fa il confronto con il dato italiano, si vede come l'energia abbia un costo elevato sia prima sia dopo l'applicazione delle imposte. L'alto costo dell'energia senza tasse suggerisce l'esistenza di inefficienze nella produzione di energia: basti pensare che circa 21 TWh sono dispersi nella griglia elettrica, sebbene questo sia un numero fisiologico indipendente dal Paese, dovuto a un mero limite tecnologico, poiché l'energia tra-

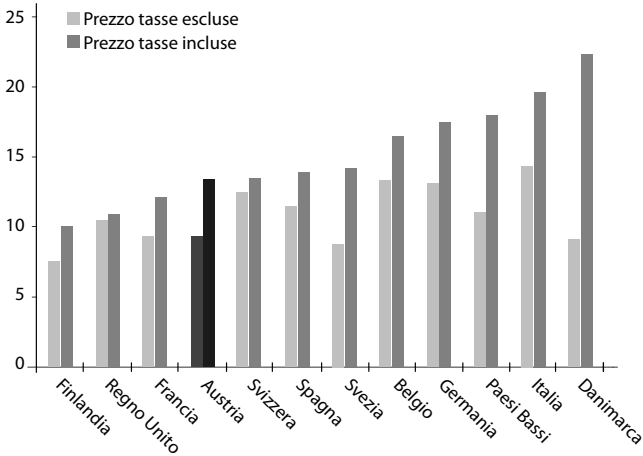


Fig.8 Costi dell'energia in centesimi di euro /kWh in vari Paesi europei, con e senza tasse nel 2007 (Mod. da [12])

sportata dalla centrale al consumatore viene in parte perduta. Si tratta di una quantità enorme, in effetti, che potrebbe essere ridotta utilizzando cavi superconduttori ad alta temperatura, con un risparmio che coprirebbe anche i costi della nuova tecnologia. Purtroppo questo tipo di tecnologia non è ancora matura: i materiali superconduttori convenzionali devono essere mantenuti a temperature bassissime, vicine a 270°C sotto lo zero, alle quali le correnti elettriche scorrono senza dissipazione e senza generare calore. Naturalmente il costo per tenere i cavi a una temperatura tanto bassa sono proibitivi. Recentemente, tuttavia, sono stati scoperti alcuni composti che divengono superconduttori a temperature più alte: in tal caso la soluzione potrebbe essere interessante per diminuire gli sprechi. Naturalmente i superconduttori di questo tipo avrebbero altre applicazioni importanti, per esempio, nei trasporti e nei calcolatori.

Tornando ai prezzi dell'energia, il dato sicuramente più interessante è quello dell'Austria che, come ricordato più volte, produce oltre il 60 per cento della sua energia da fonti rinnovabili [14]. I valori sono confrontabili con quelli della Francia, dove circa l'80 per cento della produzione proviene dal nucleare. Come si può osservare, il prezzo escluse le tasse è esattamente lo stesso nei due

Paesi. I costi sono leggermente più bassi nel Regno Unito e in Finlandia, dove esistono importanti giacimenti di petrolio.

In definitiva, è possibile osservare che pur partendo da differenti quote di fonti convenzionali e alternative, i prezzi finali sono su livelli confrontabili, e chiaramente ciascun Paese dovrebbe poter fare una scelta sulla base delle risorse di cui dispone. Chi ha molto petrolio e/o carbone continuerà a bruciarli fino all'esaurimento con i problemi d'inquinamento che ne conseguono [15]. Chi ha risorse e tecnologie nucleari continuerà a utilizzarle, avendo a disposizione siti dove seppellire le scorie radioattive. Chi non ha né il primo né il secondo tipo di risorsa, come l'Austria, può investire nelle energie alternative diversificate per ottenere una produzione stabile e costante di energia [16].

Con uno sguardo più prospettico, è possibile sottolineare alcuni aspetti importanti:

- La tecnologia delle energie alternative non è sofisticata come, per esempio, quella nucleare. Anche se i primi prototipi non sono all'avanguardia, possono essere realizzati in casa con manodopera locale e con l'utilizzo di risorse naturali presenti sul territorio. Il caso della Cina è esemplare: le turbine cinesi forse non sono efficienti quanto quelle tedesche ma costano meno e miglioreranno con l'esperienza.
- La Francia possiede circa 60 centrali nucleari operative e parte dell'energia prodotta viene venduta a Paesi confinanti. L'industria nucleare francese è molto vivace: oltre alle attività sul suolo nazionale, esporta tecnologia nel mondo. L'emissione di anidride carbonica in Francia è meno di un decimo circa di quella di Germania, Regno Unito e Danimarca. La costruzione degli impianti è cominciata in Francia a partire dal 1973, dopo la crisi petrolifera, e in 15 anni sono state realizzate 56 centrali. In media, gli impianti sono rimasti operativi per circa 25 anni: è quindi prevedibile che la produzione di energia continui ancora per circa 15 anni. Le centrali obsolete dovranno essere smantellate con un costo assai alto, come prevedibile sulla base dell'esperienza della messa in sicurezza della centrale di Shoreham, negli Stati Uniti, costata circa 190 milioni di dollari nel 1995. Quando sarà il momento, per smantellare 60 centrali nucleari occorrerà l'equivalente di circa 12 miliardi di dollari

del 1995. Il prezzo di questo *decommissioning* probabilmente non è incluso nelle bollette attuali dell'energia elettrica dei cittadini francesi.

- Con i dati disponibili, è possibile avventurarsi in una previsione per un possibile scenario di produzione di energia anche per l'Italia. Nella figura 9 è riportato il grafico della produzione di energia rinnovabile e quella totale dal 1994 al 2007: la prima è pressoché costante nel tempo e copre circa il 15 per cento del fabbisogno complessivo, mentre l'energia totale è in aumento per soddisfare i bisogni crescenti del Paese. La freccia orizzontale indica approssimativamente il livello teoricamente raggiungibile del 60 per cento, corrispondente a una produzione di energia rinnovabile di circa 200.000 GWh con un risparmio notevole sulle importazioni di petrolio e/o di altre forme di energia dall'estero. Il prezzo di una tale quantità di energia, è di circa 3 miliardi di euro l'anno: un investimento consistente nell'economia di un Paese europeo e un contributo importante alla tutela dell'ambiente.

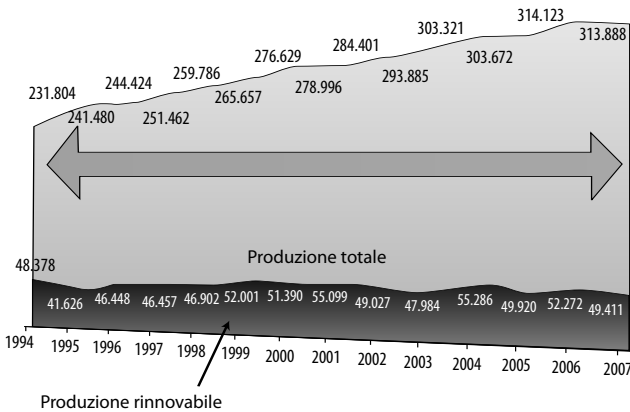


Fig.9 Produzione lorda totale e rinnovabile in Italia dal 1994 al 2007 (GWh). La freccia orizzontale è la previsione di aumento di produzione di energia da fonti rinnovabili basata sull'esperienza dell'Austria (Mod. da [11])

L'energia del futuro: la fusione nucleare

Immaginiamo che in un prossimo futuro lo sviluppo economico e il benessere diffuso coinvolga anche i Paesi poveri, che attualmente purtroppo sono la maggioranza. In tal caso è prevedibile che aumenterebbero anche i consumi energetici e, tenuto conto delle stime dello sviluppo demografico mondiale, è possibile ipotizzare un aumento di circa cinque volte rispetto ai valori attuali. Ciò implicherebbe che le nostre riserve fossili sarebbero sufficienti non più per 100 anni ma per 20. Lo stesso discorso varrebbe per il nucleare come utilizzato oggi. A questo punto sarebbe necessario passare al nucleare "pulito" che allungherebbe la disponibilità di risorse fino a un periodo di 1.000 anni, fornendo circa il 10 per cento dell'energia necessaria. Anche per le energie alternative vi sarebbe una richiesta maggiore, poiché le altre risorse sarebbero o non sufficienti oppure non facilmente sfruttabili nei Paesi che non dispongono di tecnologia avanzata. Tutto ciò porterebbe inevitabilmente a una crescita dei prezzi dell'energia e quindi a un rallentamento dell'economia. Invece di sperare che i Paesi poveri rimangano sempre tali per mantenere il benessere di quelli ricchi, è possibile valutare in che modo si possano ottenere prezzi dell'energia che consentano lo sviluppo generalizzato di tutte le nazioni.

Considerando che la Terra è riscaldata da miliardi di anni dal Sole, possiamo pensare di sfruttare in modo controllato lo stesso processo fisico che tiene "accesa" la nostra stella: la fusione nucleare, che è in un certo senso il processo inverso della fissione. In quest'ultimo processo, un nucleo di grandi dimensioni, tipo l'uranio, formato da molti protoni e neutroni, si rompe in due grossi frammenti radioattivi e alcuni neutroni. L'energia cinetica dei frammenti viene trasformata in calore che serve a far funzionare le turbine mentre i neutroni emessi innescano altre fissioni e così via. La fusione avviene invece tra due protoni o nuclei di atomi molto leggeri come gli isotopi dell'idrogeno (deuterio e trizio), l'elio 3 e il boro 11. La fusione di tali elementi produce solitamente una o più particelle alfa (che non sono altro che nuclei di elio 4, ciascuno formato da due protoni e due neutroni) più un neutrone o un'altra particella carica a seconda dei nuclei reagenti. Essendo questo un processo nucleare, le energie in gioco sono milioni di volte superiori alle energie in gioco nei processi chimici, quale per esempio

la combustione della benzina: ciò significa che il potere energetico del processo di fusione o fissione di un grammo di materiale corrisponde a una decina di tonnellate circa di combustibile fossile. Se si considera quanto siano abbondanti i nuclei leggeri in natura – una parte su 500 dell'acqua contiene deuterio, per esempio – si comprende come questa risorsa sia virtualmente infinita.

Purtroppo il processo di fusione, anche se ottenibile in modo agevole negli acceleratori di particelle, non è facilmente controllabile allo scopo di produrre energia elettrica. All'interno del Sole e delle altre stelle, queste reazioni avvengono naturalmente perché la loro grande forza gravitazionale confina un gas costituito da elementi leggeri. Quando la densità raggiunge valori estremamente elevati, gli atomi o gli ioni sono così vicini che viene innescata la fusione. Il processo produce un'energia sufficiente a riscaldare il gas ad altissime temperature, dando luogo a un nuovo stato della materia chiamato plasma, in cui i nuclei carichi positivamente sono scissi dagli elettroni carichi negativamente. Ora nuclei ed elettroni si muovono ad altissime velocità ma non possono lasciare il Sole a causa dell'attrazione gravitazionale. Le alte velocità rendono più elevata la probabilità di fusione e viene prodotta nuova energia, assieme a nuclei più pesanti, che riscaldano l'universo e portano anche alla formazione di pianeti e all'evoluzione del cosmo in generale.

Per riprodurre questo processo sulla Terra è necessario creare un plasma, formare cioè uno stato della materia più o meno denso a una temperatura di alcuni milioni di gradi, come nel Sole, e tenerlo confinato per un tempo abbastanza lungo da permettere un numero di fusioni sufficienti a produrre un guadagno rispetto all'energia spesa per formare il plasma. Negli ordigni nucleari la produzione di energia avviene in modo non controllato e devastante utilizzando il processo di fissione e quello di fusione contemporaneamente. Una proposta per sfruttare a fini civili questa tecnologia già disponibile consiste nel far esplodere piccoli ordigni nucleari in grossi blocchi di cemento e convertire l'energia prodotta in elettricità. Appare però evidente la scarsa "eleganza" del processo: si tratta infatti di una sorta di ultima spiaggia, qualora non si riesca a trovare un metodo meno distruttivo e inquinante per controllare la fusione.

Uno dei progetti più avanzati per ottenere la fusione control-

lata è ITER, già finanziato e in costruzione in Francia [17]. Si tratta di una macchina molto sofisticata originariamente proposta in Russia denominata tokamak, acronimo in lingua russa per “cella toroidale con bobine magnetiche”. Il tokamak, costruito per la prima volta circa mezzo secolo fa a livello dimostrativo, consiste in una specie di ciambella cava, al cui interno viene fatto circolare un plasma ad altissima temperatura, superiore a quella della Sole, ma a bassissima densità, molto inferiore a quella dell’aria, per esempio. Per evitare che si disperda o tocchi i bordi della “ciambella”, il plasma viene deflesso e fatto circolare all’interno del tokamak mediante l’applicazione di campi magnetici estremamente intensi. Raggiunte la temperatura e la densità ideali, il plasma si “accende”: al suo interno avvengono fusioni nucleari controllate simili a quelle del Sole, con la forza confinante gravitazionale sostituita dai forti campi magnetici. L’accensione del plasma aumenta la sua temperatura moltiplicando il numero di fusioni e producendo quindi energia. Tuttavia, il processo non può essere confinato all’infinito, poiché all’aumentare della temperatura ioni ed elettroni acquistano un’energia cinetica sufficiente a superare la barriera magnetica e a lasciare il plasma, che così si raffredda e si spegne. La sfida è quindi quella di confinare il plasma più a lungo possibile, al fine di produrre la massima energia.

In figura 10 sono rappresentati ITER e JET, un altro tokamak in funzione da diversi anni nel Regno Unito [18]. JET è un progetto europeo grazie al quale è stata dimostrata la fattibilità della fusione, frutto della collaborazione con altri Paesi del mondo come il Giappone, dove è operativo un tokamak di simili dimensioni denominato JT60. A JET partecipa anche l’Italia, che dispone di tokamak più piccoli a scopo di ricerca, come l’FTU dell’ENEA di Frascati, vicino a Roma. In una sessione sperimentale di JET, il plasma è stato tenuto acceso per circa un secondo, un tempo sufficiente a produrre un’energia di fusione pari a quella spesa per il funzionamento della macchina. Un confinamento per un tempo più lungo o un volume più grande del plasma porterebbero a un guadagno di energia: raggiungerli è lo scopo di ITER, un progetto ambizioso che punta a ottenere campi magnetici intensi mediante l’utilizzo di materiali superconduttori e di elettronica sofisticata. La progettazione e la realizzazione dell’impianto hanno richiesto un enorme sforzo umano e un investimento previsto di circa 5 miliardi di euro

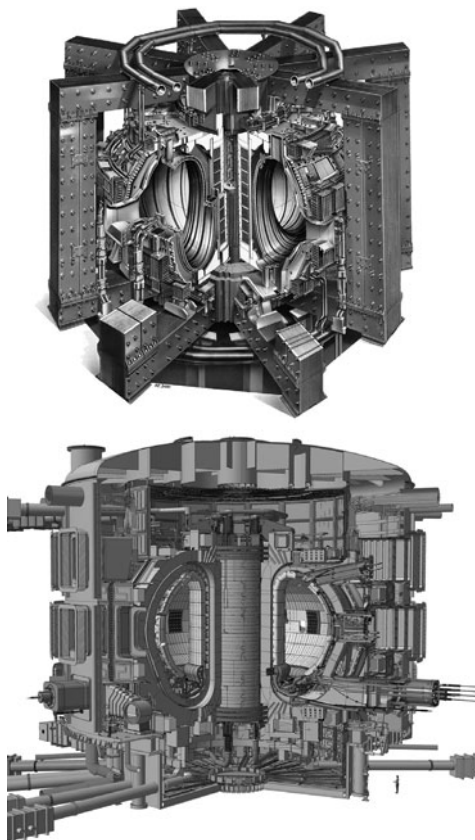


Fig. 10 Confronto tra il tokamak JET (*in alto*) operativo in Inghilterra e quello proposto e in costruzione in Francia: ITER (*in basso*). (Foto: EFDA-JET, ITER)

a cui contribuiscono Paesi di tutto il mondo. Quando nel 2016 entrerà in funzione, sarà disponibile la prima centrale a fusione nucleare della storia. Successivamente, il problema sarà quello di rendere i costi più competitivi e la tecnologia disponibile per tutti. Il progetto ha anche altri vantaggi, come la bassa radioattività, limitata alla produzione di neutroni che potrebbero essere utilizzati per produrre trizio da utilizzare successivamente come combustibile. Inoltre, non è possibile che avvengano incidenti nucleari, dal momento che il materiale combusto è dell'ordine dei grammi, una

quantità insufficiente quindi a provocare esplosioni nucleari.

Un progetto alternativo al tokamak è già in fase avanzata di costruzione: denominato NIF, acronimo di *National Ignition Facility*, esso prevede di colpire opportunamente un bersaglio costituito da deuterio e trizio con circa 200 fasci laser di altissima potenza [19].

Nel "cuore" della NIF, una cavità cilindrica costituita da oro o materiali più pesanti viene illuminata in modo uniforme da radiazione laser visibile di colore rosso (o a frequenze più alte), simile a quella dei laser giocattolo che sono ormai di uso comune, ma di altissima energia. La riflessione di questa radiazione da parte del materiale produce raggi X molto più penetranti che convergono, si spera in modo uniforme, sul bersaglio di combustibile, comprimendola. Se la compressione è uniforme ed energetica, il bersaglio raggiunge una densità tale da dare inizio a reazioni nucleari a catena producendo molta energia: è come se per un tempo molto breve, dell'ordine del milionesimo di secondo, si producesse una piccola stella artificiale in una gocciolina del peso di qualche grammo. A fronte di una "stella" di dimensioni così limitate, l'energia prodotta è elevatissima, pari a circa 40-100 volte quella spesa per fare funzionare i 200 laser ciascuno dei quali produce un fascio di circa 10.000 joule, un valore elevatissimo.

Uno dei problemi principali del progetto è quello dei costi: quello del bersaglio di combustibile è di circa un milione di dollari, che dovrà essere ridotto a circa 25 centesimi di dollaro! L'investimento necessario per la costruzione della NIF, una struttura grande all'incirca come tre campi da calcio, è pari a circa 5 miliardi di dollari, confrontabile cioè a quello di ITER.

Un progetto simile denominato MegaJoule, poiché sfrutta un solo laser di energia dell'ordine del milione di joule, è in costruzione in Francia, mentre un altro, chiamato Hiper, che utilizza uno schema di combustione leggermente diverso dal NIF, è stato proposto a livello europeo nel 2008 [20].

Esistono poi molte strutture con laser di prestazioni inferiori che hanno lo scopo di verificare su piccole scale alcune delle idee che potrebbero essere utilizzate nei grandi laboratori. Tra questi è possibile ricordare il laboratorio ABC dell'ENEA di Frascati dotato di due fasci laser di circa 100 joule ciascuno con durata di circa tre nanosecondi. Un tale laboratorio si presta facilmente a subire note-

voli migliori, come l'aumento dell'energia, grazie a nuove tecniche che successivamente potrebbero essere trasferite al progetto Hiper.

Come già accennato, il combustibile da utilizzare nei primi esperimenti è costituito da deuterio e trizio, i due isotopi dell'idrogeno i cui nuclei sono dotati, rispettivamente, di uno e due neutroni. Il deuterio si trova nell'acqua in una piccola percentuale ed è quindi abbondante; il trizio è invece radioattivo e può essere ottenuto nelle centrali nucleari o utilizzando i numerosi neutroni formati nella fusione. Il problema è che questi ultimi non sono utilizzabili efficientemente nella conversione in energia elettrica. Inoltre, interagendo con i materiali del reattore, i neutroni li rendono radioattivi, anche se la radioattività è abbastanza modesta (praticamente nulla nel caso della NIF) e facilmente eliminabile, pur con un aumento dei costi.

L'ideale sarebbe sostituire il trizio con l'elio 3, il cui nucleo è formato da due protoni e un neutrone. Nella reazione elio più deuterone si liberano un protone e un nucleo di elio 4 che sono entrambe particelle cariche e sono quindi facilmente controllabili e pulite. Il problema è che l'elio 3 praticamente non esiste sulla Terra e crearlo artificialmente ha un costo elevato. *Fortunatamente*, giacimenti importanti di elio 3 sono stati scoperti sulla Luna. Questo spiega l'improvviso interesse per la colonizzazione della Luna di diversi Paesi, tra cui Russia e Stati Uniti, mentre Cina, India, Giappone e altri seguiranno tra breve.

Il progetto della NASA, in particolare, ricorda il film di fantascienza "2001 Odissea nello spazio" poiché prevede spazi abitativi rigorosamente alimentati a energia solare per i minatori del futuro e sonde orbitanti per le comunicazioni, nonché una serie di auto a energia solare adatte a spostarsi sulla superficie lunare. Un modulo di allunaggio riutilizzabile consentirebbe di caricare il minerale estratto e di rientrare nell'orbita lunare per scaricarlo in uno *space tug*, un grosso camion spaziale che lo trasferirebbe alla base spaziale orbitante attorno alla Terra, attualmente in costruzione. Da qui il materiale verrebbe trasferito su un nuovo *shuttle* che lo porterebbe sulla Terra, dove verrebbe venduto per l'utilizzo nelle centrali a fusione.

Si stima che l'elio stivato possa soddisfare i fabbisogni energetici degli Stati Uniti per un anno, con guadagni tali da giustifi-

care la colonizzazione dello spazio, mentre le riserve lunari dovrebbero essere sufficienti per migliaia di anni. Altri importanti giacimenti di elio 3 si trovano su Marte e sui satelliti di Giove, anche se si ritiene che la sua disponibilità sia virtualmente infinita almeno finché esisterà il Sole: esso si forma nelle reazioni nucleari di fusione all'interno delle stelle e viene poi trasportato dai venti solari per depositarsi su pianeti e satelliti.

L'energia nucleare da fissione

Il processo di fissione

I costituenti elementari della materia, com'è noto, sono gli atomi. Questi a loro volta, sono formati da elettroni, particelle cariche negativamente di piccola massa che orbitano ad alta velocità attorno a un nucleo centrale costituito da particelle circa 2.000 volte più pesanti e di carica positiva – i protoni – o carica nulla, i neutroni.

Un modo assai semplice di rappresentare un atomo è mediante il cosiddetto modello planetario: il moto degli elettroni attorno al nucleo è infatti simile a quello dei pianeti attorno al Sole, poiché la forza che agisce tra le particelle cariche, che viene chiamata coulombiana, ha la stessa forma di quella gravitazionale che agisce tra le masse. La forza coulombiana, che deve il suo nome allo scienziato francese Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) che per primo ne diede una descrizione quantitativa, è molto più "intensa" di quella gravitazionale; inoltre può essere attrattiva (tra cariche opposte) o repulsiva (tra cariche dello stesso segno) a differenza di quella gravitazionale, che è solo attrattiva.

La distanza tra gli elettroni e il nucleo è molto limitata, dell'ordine di un decimiliardesimo di metro, unità di misura nota come angstrom (simbolo Å)¹ e l'energia d'interazione è dell'ordine dell'elettronvolt (eV)². Per avere un'idea delle dimensioni in gioco, basti pensare che se il nucleo dell'atomo di idrogeno fosse una pallina da ten-

¹ In onore del fisico danese Anders Jonas Ångström (1814-1874).

² L'elettronvolt è definito come l'energia acquistata da un elettrone libero che passa attraverso una differenza di potenziale di 1 volt.

nis, l'elettrone si troverebbe a una distanza di 2.000 metri. Le dimensioni del nucleo, peraltro, sono ancora più piccole, dal momento che protoni e neutroni sono confinati all'interno di una sfera con un raggio dell'ordine di un milionesimo di milionesimo di metro, pari a un fermi³ (simbolo fm). Poiché i protoni sono particelle cariche, a queste piccole distanze si ha un potenziale repulsivo tra di essi di milioni di eV (megaelettrovolt, simbolo MeV). La domanda che sorge spontanea è come facciano i protoni a stare assieme con una forza coulombiana repulsiva di tale intensità che tende ad allontanarli. La risposta è nel fatto che nel nucleo agisce anche un nuovo tipo di potenziale, di tipo attrattivo, che lega tra loro protoni e neutroni. La fisica ci dice che questo potenziale nucleare è molto intenso, dell'ordine della decina di MeV, e che agisce su piccole distanze, dell'ordine di alcuni fermi. Tale circostanza implica l'esistenza di nuclei pesanti, in cui sono presenti diversi protoni (con un numero maggiore o uguale di neutroni).

Il limite a questo processo di accrescimento progressivo è proprio dato dal fatto che a un certo punto il potenziale repulsivo coulombiano diventa maggiore di quello attrattivo nucleare, rendendo il nucleo instabile. Questo spiega perché la tavola periodica degli elementi è limitata e gli atomi più pesanti hanno circa 100 protoni e un numero di poco superiore di neutroni. In nuclei di carica elevata, come nel caso dell'uranio, che possiede 92 protoni, i due potenziali sono circa equivalenti e quindi il sistema può non essere stabile. In alcuni casi il potenziale coulombiano prende il sopravvento e il nucleo si rompe, a volte in due parti con masse tra loro quasi uguali, più alcuni neutroni: questo processo prende il nome di fissione. In esso i due frammenti di fissione vengono emessi con una certa energia cinetica dovuta alla repulsione reciproca. Sapendo che l'energia coulombiana tra due protoni nel nucleo è dell'ordine dei MeV e che i due frammenti hanno una carica di circa 50 (tanti infatti sono i protoni presenti in ciascun frammento) otteniamo un'energia cinetica dell'ordine delle centinaia di MeV: questa è l'energia che può essere utilizzata per produrre elettricità.

In definitiva, il processo di fissione è dovuto a un delicato bilanciamento tra repulsione coulombiana e attrazione nucleare: un ruolo importante è svolto dai neutroni, che in un certo senso aumentano

³ In onore del fisico italiano Enrico Fermi (1901-1954).

l'attrazione nucleare. È per questo che alcuni nuclei ricchi in neutroni possono essere stabili mentre altri, più poveri di queste particelle, decadono dopo un certo tempo, casuale e imprevedibile. Per caratterizzare la facilità con cui una specie nucleare decade si usa un parametro chiamato tempo di dimezzamento, definito come l'intervallo di tempo dopo il quale il numero di nuclei decaduti è la metà del totale. Per esempio, l'U-235 ha un tempo di dimezzamento di circa 700 milioni di anni mentre nel caso dell'isotopo U-238, che ha sempre 92 protoni ma 3 neutroni in più, tale valore raggiunge i 4,4 miliardi di anni, ed è quindi considerato praticamente stabile.

Chiaramente, si tratta di tempi molto lunghi su scala umana, anche per l'uranio 235. Se tuttavia si ha a che fare con un grammo di materiale, il numero di nuclei che possono decadere è molto elevato: ciò significa che a ogni istante possiamo avere una quantità notevole di nuclei che fissionano spontaneamente.

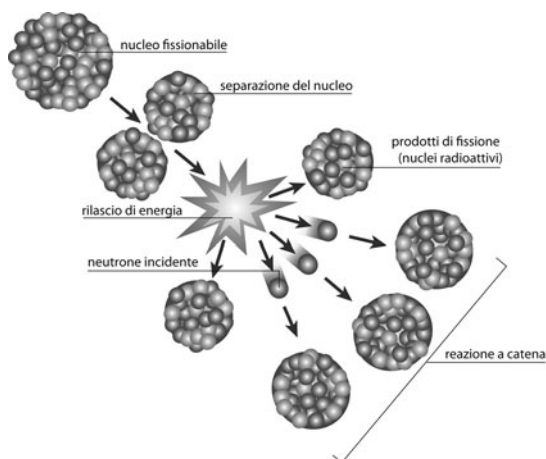


Fig. 1 Schema di una reazione di fissione

La fissione è il primo ingrediente per realizzare una centrale nucleare e, purtroppo, anche una bomba. Il secondo ingrediente è la liberazione di alcuni neutroni, 2 o 3 in media, durante tale processo.

Se opportunamente rallentati, utilizzando acqua o grafite, essi vengono facilmente catturati da altri nuclei di U-235 provocando istantaneamente una nuova fissione. Da questa si originano poi altri neutroni, che a loro volta possono collidere con altri nuclei, e così via. Se questo processo di moltiplicazione delle fissioni avviene senza limiti si ha una reazione a catena e quindi un'esplosione, se invece viene controllato si può avere una sorgente continua di energia. Il processo è schematicamente illustrato in figura 1.

Naturalmente la domanda che può sorgere in questo momento è la seguente: se il materiale è radioattivo, cioè decade dopo un certo tempo, è possibile trovarne sulla Terra? Una delle principali fonti di uranio è il minerale uraninite (formula chimica UO_2) noto anche come pechblenda se si trova nella sua forma colloidale (fig 2).



Fig.2 Campione di uraninite, minerale che rappresenta una delle principali fonti naturali di uranio (Foto: Jedrezej Pelka)

In effetti nelle miniere naturali si trova poco U-235 e molto più U-238: dalla formazione del nostro pianeta a oggi l'isotopo più leggero è in gran parte decaduto, mentre il 238 è rimasto essenzialmente invariato. Per questo motivo la concentrazione dell'isotopo 235 è dell'ordine dello 0,7 per cento rispetto al 238. Poiché la concentrazione è diminuita con il passare del tempo dopo la formazione del nostro pianeta, è intuitivo pensare che in passato in qualche miniera di ura-

nio vi siano state concentrazioni degli isotopi tali da formare una centrale nucleare naturale. Una di queste centrali è stata scoperta negli anni Settanta a Oklo nel Gabon, e si stima che sia stata in funzione due miliardi di anni fa per alcune migliaia di anni. Per ottenere le stesse condizioni di funzionamento che c'erano a Oklo, occorre modificare artificialmente la concentrazione di un isotopo rispetto all'altro, eliminando dall'uranio naturale una notevole parte dell'isotopo più pesante.

Il processo per ottenere la giusta concentrazione, noto come arricchimento, pesa notevolmente sui costi della centrale oltre a presentare una certa pericolosità, per la necessità di maneggiare materiali radioattivi. Inoltre bisogna evitare di raggiungere concentrazioni critiche che rischiano di provocare reazioni a catena pericolose.

In tutto questo processo l'uranio 238 sembra giocare un ruolo abbastanza marginale; in effetti non è così. Come si vede nella figura 1, un neutrone prodotto dalla fissione può essere catturato dai due isotopi: quando è catturato dall'U-238, si forma l'U-239 e la catena s'interrompe. Questi elementi, assieme all'U-238 che non ha interagito e ai frammenti di fissione, radioattivi e pericolosi per la salute, costituiscono le scorie da eliminare con procedimenti opportuni che ovviamente comportano un costo, sia economico sia ambientale. Da ciò si capisce che la maggior parte dei materiali che costituiscono le scorie in realtà non ha mai subito una fissione: per questo, si pone il problema se sia possibile e opportuno separarli dalle vere scorie.

Prima di entrare nel dettaglio della produzione di energia nella centrale nucleare dobbiamo aggiungere un altro elemento a questo mosaico: che cosa succede all'U-239? In effetti, questo elemento è anche instabile e decade velocemente senza fissionare ma trasformando un protone in neutrone, in quello che è chiamato decadimento beta, dando luogo a nettunio 239. Anche questo elemento va incontro a decadimento beta, dando vita a plutonio 239 (Pu-239), anch'esso radioattivo con un tempo di decadimento di circa 24.000 anni, quindi più velocemente dell'U-235, e che decade anche per fissione. Quindi nelle scorie è contenuto plutonio che può essere utilizzato come combustibile. In tutto questo processo, è possibile utilizzare in via teorica quasi il 100 per cento dell'uranio 238, rendendo le risorse naturali sufficienti ancora per migliaia di anni. Come verrà spiegato nel seguito, gli ostacoli principali allo sfruttamento di questo processo sono di natura sia economica sia politica. Il riciclag-

gio delle scorie ha infatti un costo notevole e consente di estrarre Pu che, poiché decade molto velocemente rispetto all'U-235, è più "appetibile" per scopi militari.

Quando si arricchisce l'uranio, cioè si aumenta la concentrazione dell'isotopo 235 rispetto al 238, si ottiene materiale molto ricco di materiale fissile (tipicamente, circa il 3,5 per cento di U-235) e una parte di scarto molto povera, che prende il nome di "uranio impoverito". Per una tonnellata di materiale pronto per essere utilizzato nelle centrali, per esempio, si ottengono circa 6 tonnellate di materiale di scarto o uranio impoverito. Quest'ultimo contiene ancora circa lo 0,2-0,3 per cento di U-235, poiché diminuire ulteriormente questa percentuale avrebbe costi esorbitanti. Purtroppo, per questo materiale di "scarto" è stata subito trovata un'applicazione nel campo degli armamenti. Sfruttando le proprietà chimico-fisiche dell'uranio, in particolare la durezza e il potere penetrante superiore ad altri materiali, lo si utilizza per costruire proiettili e razzi anticarro (figura 3), mentre per converso la sua superiore resistenza rispetto ad altri materiali viene utilizzato per le corazze dei carri armati.

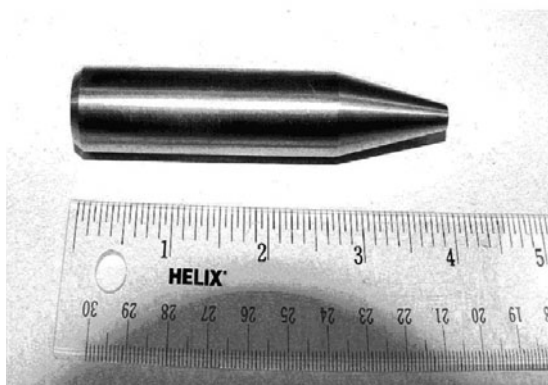


Fig. 3 Proiettile in uranio impoverito (Foto: Maclyn611)

Un semplice conto consente di comprendere che la radioattività dell'uranio impoverito è circa un terzo di quello naturale, poiché la concentrazione dell'U-235 è pari a circa un terzo di quella iniziale. Si tratta di un valore ancora piuttosto elevato, superiore spesso a quello "consentito" per legge e dalle convenzioni internazionali. Per que-

sto motivo questo materiale è vietato in Europa. In particolare, poiché queste munizioni possono uccidere anche dopo molto tempo dal loro utilizzo, possiedono alcuni requisiti per essere classificate tra le armi di distruzione di massa. Questi rischi si aggravano se invece del materiale di scarto dal raffinamento del materiale proveniente dalle miniere si utilizzano le scorie riciclate dalle centrali nucleari.

Come funziona una centrale nucleare

Una semplice descrizione del funzionamento di una centrale nucleare consente di rendersi conto dei reali rischi connessi allo sfruttamento del processo di fissione.

In figura 4 è rappresentata schematicamente una centrale nucleare utilizzata attualmente.

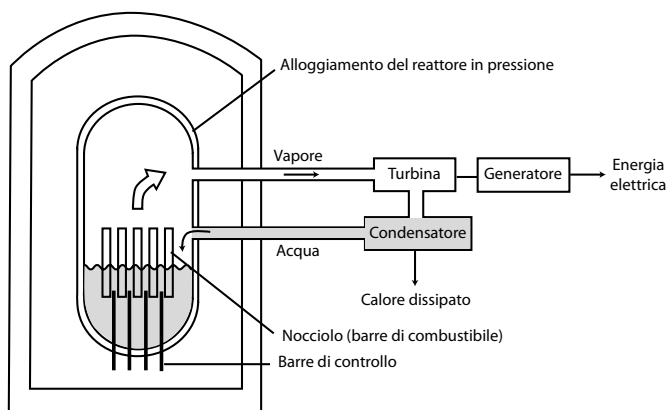


Fig. 4 Schema di funzionamento di una centrale nucleare

Le reazioni avvengono nel cuore, o nocciolo, del reattore raffreddato ad acqua naturale, nel caso qui descritto. Le barre, visibili in fig.5 nella fase di installazione, sono costituite da opportuni composti di uranio e possono essere inserite o estratte dal reattore, secondo la potenza desiderata. L'acqua ha il duplice scopo di rallentare i neutroni, in modo da avere una più alta probabilità di rea-

zione con l'uranio, e di raffreddare il nocciolo. Il calore in eccesso, infatti, viene ceduto a un circuito secondario ad acqua (assente in alcune centrali di vecchia generazione) e successivamente trasformata in vapore. Quest'ultimo muove una turbina che produce elettricità, per poi condensare dopo aver perduto il suo calore, che viene opportunamente reimmesso nel circuito. Grazie a questo schema di funzionamento molto semplice, dopo tanti anni di operatività degli impianti in tutto il mondo il numero di incidenti di rilievo è rimasto molto limitato.



Fig. 5 Barre di uranio (Foto: United States Nuclear Regulatory Commission)

Come già accennato precedentemente, l'estrazione e l'inserimento delle barre di combustibile mediante sistemi automatizzati e manovrati da una postazione remota consentono di controllare adeguatamente il numero di fissioni. Può accadere, tuttavia, che una spia luminosa non funzioni bene, oppure che un operatore dia un comando sbagliato, o infine che una leva si inceppi e si abbia un rapido incremento della temperatura del refrigerante che mandi il reattore fuori controllo. Questa serie di eventi era più probabile con i reattori di vec-

chia generazione, anche se con quelli moderni la probabilità di un incidente non può essere ridotta a zero. Con l'aumento incontrollato della temperatura dell'acqua, per esempio, si può verificare una scissione in idrogeno e ossigeno e una successiva esplosione. Se il reattore viene danneggiato e le barre non possono più essere controllate, si possono determinare condizioni simili a quelle presenti a Oklo per migliaia di anni.

In tal caso, l'unico intervento possibile consiste nell'inondare il nocciolo con un moderatore e coprire il tutto con materiali opportuni per evitare fuoriuscita di materiale radioattivo, così come è stato fatto in seguito al disastro di Chernobyl. Questa centrale, sotto l'enorme sarcofago di cemento visibile nella figura 6, sta attualmente consumando il materiale fissile e continuerà a farlo ancora per lungo tempo, sebbene i danni siano stati limitati grazie al sacrificio di tanti eroi senza nome, che subito dopo l'esplosione sono saliti sul tetto del reattore per isolare il nocciolo. A 23 anni dall'incidente, si sa che l'enorme quantità di radiazioni presenti sta danneggiando il sarcofago costruito per evitarne la fuoriuscita e che un'ulteriore usura potrebbe dare luogo a un cedimento. Per questo sarebbe opportuno finanziare un intervento a livello internazionale per mettere il reattore definitivamente in sicurezza.



Fig. 6 La centrale di Chernobyl come appare oggi: un sarcofago di cemento scherma il reattore (Foto: Redrat72)

Tenuto conto dei problemi di sicurezza e dei potenziali danni ambientali, è comprensibile la posizione di chi si oppone al nuclea-

re. Purtroppo a questo dobbiamo aggiungere il fatto che le centrali, anche quella di Chernobyl, sono bersagli ad alto rischio di attacco terroristico, così come le scorie radioattive dei siti di stoccaggio che potrebbero essere utilizzate per realizzare le cosiddette "bombe sporche". Resta comunque il fatto che il nucleare è una risorsa importante che non può essere dismessa così facilmente. Uno dei più importanti compiti della ricerca in questo campo è dunque la riduzione e l'eventuale eliminazione dei rischi connessi allo sfruttamento dell'energia nucleare. Progetti in questo senso sono stati studiati e sviluppati in tutto il mondo: un primo tipo di reattore utile in questo senso è in funzione da più di 30 anni ed è denominato CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*, [10]) mentre un prototipo italiano denominato CIRENE, in fase di costruzione a Latina, fu abbandonato dopo il referendum del 1987.

L'idea essenziale consiste nel sostituire l'acqua che agisce da moderatore con acqua pesante. Com'è noto, quest'ultima è acqua con una percentuale maggiore del normale di atomi di deuterio al posto dell'idrogeno normale. Grazie alla presenza di acqua pesante nel reattore, i neutroni prodotti nella fissione vengono rallentati e assorbiti in quantità minore rispetto a quando utilizziamo l'acqua leggera. Il motivo è semplice da capire se si pensa al neutrone e ai nuclei di idrogeno come a palle da biliardo. Se la densità dei nuclei di idrogeno è sufficientemente alta, c'è una certa probabilità che il neutrone emesso in un processo di fissione con una velocità abbastanza elevata entri in collisione con uno di essi. Poiché le due particelle hanno praticamente la stessa massa, molta dell'energia cinetica posseduta dal neutrone viene trasferita all'idrogeno, all'inizio praticamente fermo. Il neutrone così rallentato può ancora collidere con un altro atomo di idrogeno inizialmente fermo e trasferire ulteriore energia cinetica. Il processo continua fino a che il neutrone ha praticamente dissipato tutta la sua energia iniziale e si muove con un'energia paragonabile a quella propria della temperatura dell'acqua: in tal caso viene definito neutrone termico. A questo punto il neutrone può essere assorbito dall'acqua, e quindi perdersi, oppure, con maggiore probabilità, essere assorbito dall'uranio, facendolo fissionare. Se sostituiamo l'idrogeno con il deuterio, che ha una massa doppia, nelle collisioni il neutrone viene rallentato e assorbito meno efficacemente. La conseguenza è che per ottenere un numero di fissioni in grado di autolimentare la centrale occorre un minor arricchimento di U-235.

In sostanza, con opportune pratiche costruttive questo tipo di centrali può funzionare con uranio naturale, cioè senza arricchimento, eliminando così i rischi di proliferazione. Oltre a ciò, occorre sottolineare che le centrali di tipo CANDU possono utilizzare combustibile "spento" delle centrali ad acqua "leggera", poiché tale combustibile contiene ancora U-235 in buona percentuale. Inoltre, si può utilizzare anche una miscela di plutonio e uranio (detta MOX), a volte estratto dalle armi nucleari, ma soprattutto il torio, un elemento naturale circa cinque volte più abbondante dell'uranio. Il suo utilizzo porterebbe a un aumento sostanziale delle riserve energetiche (teoricamente fino a 25.000 anni). Inoltre le scorie radioattive provenienti dal torio decadono più velocemente (migliaia di anni) di quelle dell'uranio (milioni di anni). Di grande importanza, inoltre, il fatto che l'acqua pesante venga immessa nel reattore una sola volta e non vi sia alcuna necessità che venga sostituita per tutta la vita operativa della centrale. Oltre a ciò, quando vengono catturati dal deuterio i neutroni danno origine al trizio, il cui nucleo è formato da un protone e due neutroni. Tale elemento è radioattivo e pericoloso per l'uomo ma può essere realizzato nelle centrali nucleari a fusione di prima generazione, che utilizzano deuterio e trizio come combustibile.

Per quanto detto, i reattori CANDU o ad acqua pesante sembrano più virtuosi di altri. Certamente un vantaggio dei reattori CANDU è l'utilizzo di combustibili non arricchiti, che in linea di principio dovrebbe evitare il rischio di proliferazione nucleare. Per contro, le scorie radioattive contengono plutonio, che può essere selezionato per la costruzione di ordigni. In ogni caso, anche i reattori CANDU utilizzano solo una minima parte della materia prima, anche se con maggiore efficienza rispetto ad altri tipi di reattori.

Riciclaggio delle scorie e fissione "pulita"

Come accennato, in seguito all'arricchimento le barre di uranio contengono circa il 5 per cento di U-235. Dopo circa 18-24 mesi di funzionamento, il reattore deve essere spento per sostituire le barre esaurite (che possono essere ancora utilizzate nei reattori CANDU). Nel caso dei reattori CANDU, non è necessario spegnere il reattore, poiché gli elementi vengono sostituiti meccanicamente, consentendo quindi una maggiore economia di esercizio. Le barre esaurite ven-

gono trasportate nei siti adatti oppure riciclate separando le scorie radioattive dal plutonio, che è riutilizzabile come combustibile, e dall'uranio 238 che può essere reimmesso nella centrale per creare altro plutonio. Questo processo di riciclaggio crea due nuovi problemi: quello dell'inquinamento ambientale e quello della proliferazione di ordigni nucleari.

Occorre considerare a questo punto che i costi del riciclaggio sono abbastanza elevati, e questa è forse la ragione principale per cui tale soluzione non è molto praticata. Pare infatti poco probabile che la motivazione sia di ordine tecnologico, per la difficoltà a utilizzare il plutonio invece dell'uranio. Da un punto di vista economico, in definitiva, è più conveniente smaltire le scorie, anche se con esse si elimina circa il 99 per cento del materiale che potrebbe essere riutilizzato, senza poi considerare quanto sia eticamente scorretto lasciare alle generazioni future il compito di recuperare questo materiale se non si dovessero trovare valide alternative energetiche.

Il processo di separazione del materiale comporta anche notevoli rischi. Nel 1999 un incidente durante la lavorazione delle scorie a Tokai, in Giappone, provocò la morte di due addetti e la messa in sicurezza di un'ampia area attorno allo stabilimento dove avvenne l'incidente. Incaricata di "processare" e separare le scorie radioattive era un'impresa privata e la successiva indagine sulle cause dell'incidente mise in evidenza come gli addetti a questo compito non avessero ricevuto particolari istruzioni su come maneggiare il materiale e sui rischi connessi. L'episodio fa capire come possa essere pericoloso l'intreccio di tecnologia nucleare e interessi privati, un fatto di cui i progetti delle centrali della prossima generazione dovrebbero tenere conto.

Un recente progetto, almeno sulla carta, ha le potenzialità per superare i problemi fin qui discussi e in ogni caso dimostra quale potrebbe essere la centrale nucleare "ideale." Si tratta del TWR (*Traveling-Wave Reactor*), di cui recentemente è stato richiesto il brevetto negli Stati Uniti e che secondo i proponenti potrebbe essere operativo nel 2020 [22].

In breve, il TWR consiste in un cilindro di uranio naturale la cui base è sostituita da una componente particolarmente arricchita di uranio 235 che costituisce l'innesco (*start*) delle fissioni controllate: queste producono neutroni che interagiscono con l'U-238 dello strato successivo. Il plutonio che ha origine dal decadimento dell'uranio è fissile e svolge lo stesso ruolo dell'U-235 iniziale. In pratica, il pro-

cesso è simile a quello che avviene in una candela accesa che via via consuma la cera. Nel cilindro di uranio del TWR la "fiamma" iniziale si propaga molto lentamente: per esempio, in un cilindro iniziale di circa 60 centimetri si consuma un centimetro di materiale all'anno. In tal caso, la centrale può funzionare per 60 anni senza bisogno di interruzioni che consentano di ripristinare il combustibile. Poiché la centrale utilizza il "trucco" di trasformare l'uranio in plutonio, il combustibile è autogenerato e il rendimento viene aumentato di circa un fattore 60.

Quando, al termine del ciclo di operatività, le barre sono finalmente esaurite e possono essere stoccate in un deposito, il materiale radioattivo da smaltire è 60 volte inferiore a quello prodotto nelle centrali convenzionali, con ovvi vantaggi in termini di minore inquinamento e di possibilità di evitare il rischio di proliferazione di ordigni nucleari. In linea di principio, quindi, questo tipo di reattore sarebbe estremamente vantaggioso; se funzionerà o no lo sapremo dagli esperimenti sul primo prototipo.

Storicamente, esistevano già esempi di reattori autofertilizzanti che producono cioè più combustibile di quello bruciato. Il più famoso tra questi è Superphenix costruito in Francia in collaborazione con l'ENEL italiana (Figura 7).



Fig. 7 Veduta panoramica della centrale Superphenix, chiusa nel 1997 (Foto: Yann Forget)

Realizzato negli anni Settanta-Ottanta, venne definitivamente chiuso nel 1997 dopo alcuni incidenti dovuti alla mancanza di esperienza in questo tipo di reattori e soprattutto alla dura opposizione di parte della popolazione, culminata in un attacco con razzi che for-

tunatamente non danneggiò il nocciolo nucleare in costruzione. Il reattore utilizzava i neutroni non rallentati (da questo il nome di reattore autofertilizzante veloce) con un moderatore a sodio liquido. Oltre a non aver fornito i risultati sperati, Superphenix ha dimostrato di essere alquanto pericoloso e fortemente inquinante, a causa dell'utilizzo del sodio liquido e dei neutroni veloci, per non parlare dei costi assai elevati. Certamente il crollo di un soffitto delle officine della centrale a causa di un'abbondante nevicata non ha aiutato a fugare i timori.

Naturalmente anche in questo caso i costi del reattore si sono rivelati esorbitanti: una relazione del 1996 della Corte dei conti francese stima la somma spesa complessivamente in oltre nove miliardi di euro. Le barre di combustibile sono state infine immagazzinate da qualche parte nel 2003, mentre il sodio di raffreddamento non è ancora stato smaltito. Rimane il dubbio se questo enorme investimento senza ritorno alcuno sia andato a gonfiare le bollette dell'energia elettrica dei francesi o se sia invece stato "dissipato" sotto qualche altra forma di tassa non direttamente collegata all'energia consumata (per esempio nel prezzo della benzina, che in Francia è pari a circa il triplo di quello degli Stati Uniti).

Purtroppo si possono raccontare altri esempi eclatanti e inquietanti di progetti finiti nel nulla, come nel caso del prototipo di reattore veloce PFR costruito a Dounreay in Gran Bretagna, che entrò in funzione nel 1975 e fu dismesso nel 1994, cioè dopo meno di 20 anni (e non 40 o 50 come si prevede di solito per i reattori nucleari).

Ma la storia non finisce qui: ancora oggi una considerevole forza lavoro è impegnata nel decommissionamento del reattore che, secondo le previsioni, dovrebbe essere completato nel 2036 (con la possibilità di riutilizzare la zona per il 2336!) e un ulteriore costo di oltre 3 miliardi di euro.

Tra i possibili rischi che minacciano questo come altri siti in via di dismissione, anche tra quelli italiani, si possono citare la lenta erosione dei fusti di scorie da parte dell'acqua di falda, l'inquinamento del mare e dei terreni circostanti la centrale e infine la contaminazione di svariate tonnellate di sodio utilizzate per il raffreddamento. A causa dell'elevata presenza di materiale radioattivo, la zona è sotto massiccia sorveglianza della polizia.

Le energie alternative

Come accennato nel primo capitolo, molte delle criticità dello sfruttamento del petrolio e del nucleare convenzionale potrebbero essere superate almeno in parte grazie alle fonti rinnovabili, che in questo capitolo passeremo in rassegna in modo più dettagliato.

Idroelettrico e geotermico

L'idroelettrico è la forma di energia rinnovabile più sfruttata: è responsabile infatti di circa il 20 per cento dell'elettricità prodotta a livello mondiale. Dal punto di vista concettuale è molto semplice, poiché sfrutta la caduta dell'acqua per gravità ma richiede importanti investimenti economici e umani e ha un impatto ambientale non trascurabile. In alcuni casi gli impianti possono essere realizzati solo evacuando intere popolazioni dalle zone che dovranno essere occupate dall'acqua degli invasi. Un caso eclatante in questo senso è quello della centrale delle Tre Gole in Cina, una delle più grandi al mondo (Fig. 1). Anche progetti meno imponenti, tuttavia, hanno portato a notevoli modificazioni dell'assetto idrogeologico della zona.

Oltre a ciò, le centrali idroelettriche presentano un certo grado di pericolosità. La diga delle Tre Gole, fortunatamente, non è stata danneggiata dal terremoto devastante che ha colpito la Cina nel 2008. Non è stato così per la centrale di Banqiao, sempre in Cina, dove nel 1975 la diga collassò a causa delle avverse condizioni meteorologiche e oltre 150.000 persone persero la vita. Nel nostro Paese, il più grande disastro che si ricordi in questo ambito è stato quello della diga del Vajont, dove nel 1963 perirono circa 2.000 persone a causa



Fig. 1 Un'immagine delle Diga delle Tre Gole sul fiume Yangtze, che delimita l'invaso della più grande centrale idroelettrica del mondo (Foto: Dan Kamminga)

di instabilità geologiche non previste (o ignorate) da ingegneri e geologi responsabili del progetto. In definitiva, dal punto di vista statistico le centrali idroelettriche sono di gran lunga più pericolose di quelle nucleari.

Lo stesso grado di semplicità concettuale si ritrova in un'altra fonte alternativa di energia: il geotermico, che consiste nello sfruttare le fonti geologiche di calore. Il nostro Paese, come già accennato nelle pagine precedenti, può vantare un primato a riguardo, grazie all'iniziativa del principe Piero Ginori Conti, che nel 1904 realizzò il primo generatore di elettricità geotermica a Larderello, in Toscana. Ancora oggi nella regione vengono prodotti più di 5.000 GWh di elettricità da geotermico.

Un aspetto cruciale è che il geotermico ha notevoli prospettive di sviluppo, poiché mediamente nel mondo viene sfruttato al 10 per cento delle sue potenzialità.

Ma quali sono le zone che consentono questo tipo di sfruttamento energetico? Esistono aree nel mondo particolarmente "calde" che delimitano zone in cui movimenti delle placche terrestri inducono nelle rocce del sottosuolo sforzi estremi, che a loro volta danno origine a fenomeni geologici catastrofici come le eruzioni vulcaniche o i terremoti, in cui viene liberata una grande quantità di energia con conseguenze devastanti.

L'Italia ha un territorio molto inquieto da questo punto di vista, con conseguenze che sono sotto gli occhi di tutti. Il riflesso positivo di questa geologia peculiare è l'enorme potenziale geotermico: l'energia ricavata dal sottosuolo potrebbe addirittura decuplicare, raddoppiando di fatto l'attuale produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, contro una possibilità di incremento del 10 per cento della media dell'Europa. A conti fatti, l'energia fornita sarebbe equivalente a quella prodotta da circa tre centrali nucleari di 1,6 GW, mentre per entrare in competizione con il nucleare dal punto di vista economico i costi dovrebbero essere inferiori a 15 miliardi di euro. L'esperienza della centrale di Larderello permette di affermare che tale obiettivo può essere raggiunto e che sul lungo periodo gli eventuali investimenti vengono ampiamente recuperati. Questa fonte di energia, inoltre, a differenza di altre come l'eolico o il solare, non dipende in modo sensibile dalle condizioni meteo o dalle differenze tra giorno e notte.

Recentemente sono stati proposti, e in alcuni casi sperimentati, nuovi metodi per l'estrazione di energia dal sottosuolo denominati *Enhanced Geothermal System* (EGS) [24-28]. Uno di questi consiste nel pompare acqua ad alta pressione in tubazioni che arrivano oltre i cinque chilometri di profondità: infiltrandosi tra le rocce e creando delle microfrazture, l'acqua assorbe calore e raggiunge temperature elevate (per rendere un'idea della temperatura di queste rocce basta sapere che per ogni chilometro di profondità, la temperatura del sottosuolo aumenta di circa 30°C, come sa bene chi ha letto *Viaggio al centro della Terra* di Jules Verne). L'acqua calda può poi ritornare in superficie tramite uno o più pozzi secondari e il vapore così formato aziona una turbina producendo energia elettrica. Poiché il calore interno della Terra è praticamente infinito, questo metodo può, in linea di principio, fornire una quantità notevole di energia.

Naturalmente, occorre valutare attentamente anche le possibilità tecnologiche di realizzare questo tipo di progetti. A riguardo, può venire in aiuto l'esperienza delle perforazioni della crosta terrestre maturata in ambito petrolifero, dove si è arrivati a profondità di circa 12 chilometri. In particolare, prima di effettuare scavi *ex novo* che arrivano a costare svariati milioni di euro, si potrebbero riconvertire i pozzi già scavati per cercare il petrolio senza successo, le miniere abbandonate o le centrali geotermiche esaurite.

Non sono da trascurare, tuttavia, i rischi connessi agli impianti in profondità e all'alterazione chimico-fisica degli strati geologici

profondi. Non è escluso che le microfratture create artificialmente, possano provocare terremoti. D'altra parte, è possibile ipotizzare anche che l'acqua immessa nel sottosuolo possa determinare un raffreddamento delle rocce e quindi una loro maggiore resistenza agli sforzi, diminuendo così la probabilità che i terremoti si verifichino. Solo un'esperienza diretta potrebbe indicare quale dei due effetti sia prevalente. Anzi, allargando lo sguardo la disponibilità di una serie di centrali EGS potrebbe essere utilizzata per la ricerca e il monitoraggio del sottosuolo diventando così uno strumento importante per la comprensione, e forse la previsione, non solo dei terremoti, ma anche dei movimenti della crosta terrestre in generale.

Su questo metodo di generazione del calore si stanno ora concentrando gli sforzi anche finanziari di molti Paesi e nel prossimo futuro saranno disponibili valutazioni realistiche della fattibilità di una centrale di questo tipo e della sua competitività economica con altri metodi.

In uno studio del MIT del 2006, per esempio, sono state delineate interessanti possibilità per questo sistema di estrazione dell'energia [29]. In primo luogo si è stimato che, solo negli Stati Uniti, a una profondità di circa 3-10 chilometri vi sono circa 13.000 zettajoule di energia (1 zettajoule è pari a 10^{21} joule, ovvero mille miliardi di miliardi di joule: un numero enorme!) di cui circa 200 ZJ sono estraibili con la tecnologia attuale e circa 2.000 ZJ, probabilmente, con tecnologie più sofisticate. Con un investimento di circa un miliardo di dollari, dicono gli esperti, si potrebbe costruire una centrale EGS capace di erogare una potenza di 100 GW.

Il lato interessante di tutto ciò riguarda il prezzo dell'energia per il consumatore finale: i calcoli mostrano come con questo sistema si possa produrre energia elettrica a un costo di circa 4 centesimi di dollaro per chilowatt, quindi competitivo con qualsiasi altro metodo di produzione di energia.

Nella tabella 1 sono mostrati diversi progetti EGS in vari Paesi del mondo. In particolare è da menzionare l'investimento dell'Australia, che ha una potenzialità di estrazione di potenza di 5-10 GW. Un segnale positivo per il metodo proposto è il fatto che anche la Germania abbia investito in questo progetto nonostante le sue riserve geotermiche siano molto modeste. In particolare, per ovviare a questo inconveniente, il progetto tedesco è legato a una legge *Feed in tariff*, o "Conto energia", come si dice nel nostro

Paese, che assicura un prezzo conveniente a chi investe sul geotermico. In questo caso il consumatore paga un po' di più l'energia elettrica ma respira meglio. A questa iniziativa hanno aderito più di 30 Paesi in tutto il mondo. Tra questi vi è l'Italia, per effetto forse di una direttiva Europea, a cui però è stata data attuazione in modo particolare, includendo l'energia ricavata dalla combustione del carbone e i termovalorizzatori di rifiuti tra le fonti rinnovabili e pulite, con il risultato prevedibile di uno stimolo poco significativo alla produzione di energia con tecnologie alternative.

In alcuni casi, come negli Stati Uniti e in Giappone, si sta studiando la possibilità di utilizzare CO₂ invece di acqua per evitare, tra gli altri, problemi di corrosione delle rocce. In particolare, questo metodo potrebbe portare a un consumo di questa sostanza nociva per l'ambiente e quindi contribuire sia direttamente che indirettamente a migliorare la qualità dell'aria.

Tab. 1 Progetti EGS nel mondo: caratteristiche e stato di avanzamento

Progetto	tipo	Nazione	Dimensioni (MW)	Profondità (Km)	Sviluppatore	Stato di avanzamento
Soultz	R&S	Francia	1,5	4,2	Engie	Operativo
Desert Park	R&S	Stati Uniti	11-50	n.d.	DOE, Ormat, GeothermEx	In fase di sviluppo
Landau	Commerciale	Germania	3	3,3	Petratherm	Trivellazione
Paralana (Fase 1)	Commerciale	Australia	7-30	4,1	Petratherm	Trivellazione
Cooper Basin	Commerciale	Australia	250-500	4,3	Geodynamics	Trivellazione
The Geysers	Dimonstrativo	Stati Uniti	n.d.	3,5-3,8	AltaRock Energy, NCPA	Abbandonato (sett. 2009)
Bend, Oregon	Dimonstrativo	Stati Uniti	n.d.	n.d.	AltaRock Energy, NCPA	Finanziamento (dic. 2009)
Ogachi	R&S	Giappone	n.d.	1,0-1,1	n.d.	Sperimentale
United Downs, Redruth	Commerciale	Regno Unito	10	4,5	Geothermal Engineering Ltd	Finanziamento
Eden Project	Commerciale	Regno Unito	3	3-4	EGS Energy Ltd.	Finanziamento

Qualora non vi siano le condizioni per uno sfruttamento geotermico mediante impianti EGS è sempre possibile utilizzare altri meto-

di come le pompe di calore che, pur non producendo elettricità direttamente, possono contribuire in modo significativo al risparmio energetico. Il primo di questi metodi si basa su un semplice fenomeno: la temperatura del sottosuolo a circa 3-10 metri di profondità è costantemente intorno a 10-15°C, sia in estate (quando è inferiore a quella dell'aria) sia in inverno (quando è più alta). Questa caratteristica può essere sfruttata mediante l'utilizzo di pompe di calore geotermiche che d'inverno estraggono calore dal terreno per riscaldare gli edifici mentre in estate trasferiscono calore dalle case al terreno. Per fare ciò occorre installare un impianto con tubazioni che scendono a una profondità opportuna riempite di liquido e collegate a una pompa geotermica, simile a un impianto di termosifoni. Il maggiore consumo di elettricità viene compensato da un risparmio generale sul consumo d'energia per regolare la temperatura degli edifici: si stima che il periodo di tempo necessario per ammortizzare i costi dell'impianto e il consumo energetico sia dell'ordine di 5-10 anni, paragonabile quindi a quelli di un impianto solare. La durata dell'impianto è di circa 25 anni e quella delle tubature sotterrate di 50 anni.

Eolico

L'energia del vento o eolica è utilizzata dall'uomo da tempo immemorabile per navigare e per produrre energia meccanica. Solo più recentemente la tecnologia, anche se non molto sofisticata, ha permesso di produrre anche energia elettrica. L'impianto necessario è un semplice "mulino a vento" opportunamente collegato a un generatore e una batteria o a un qualsiasi altro elemento in grado di utilizzare la corrente prodotta.

La data d'inizio dell'eolico moderno viene di solito fissata all'inverno 1887-1888, quando si realizzò il progetto nato dalla fertile fantasia di Charles F. Brush (1849-1929), inventore e imprenditore statunitense di Cleveland, in Ohio: un generatore elettrico mosso dal vento alto circa 20 metri in grado di fornire una potenza di 12 chilowatt grazie a un rotore collegato a pale di 17 metri di diametro (Fig. 2).

Venendo ai giorni nostri, occorre sottolineare che accanto ai ben noti vantaggi, l'eolico è afflitto da due inconvenienti di rilievo: il primo è la generazione di energia non costante, dovuta al fatto

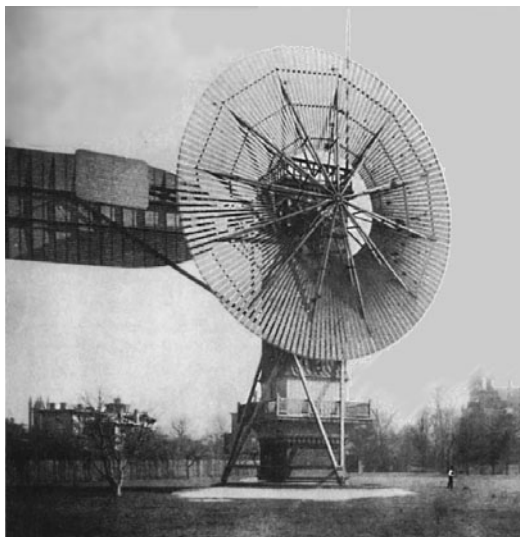


Fig. 2 Un'immagine d'epoca del primo generatore eolico, costruito a Cleveland, in Ohio, nell'inverno 1887-1888 ([30])

che il vento ha un'intensità variabile e poco prevedibile, il secondo è la difficoltà d'immagazzinamento dell'energia elettrica prodotta. L'installazione di questo tipo di impianti, in ogni caso, può essere guidata da ben dettagliate "mappe del vento" che consentono di individuare facilmente le zone più ventose. Grazie a un'attenta pianificazione, Paesi come la Germania arrivano a produrre circa 40TWh di energia eolica.

Guardando al futuro, le prospettive dell'energia eolica sono assai positive: la potenza installata è in rapida crescita, con una prevedibile diminuzione dei costi. Si stima addirittura che grazie al vento sarebbe possibile soddisfare totalmente le attuali richieste mondiali di energia, se non fosse per l'intermittenza della potenza erogata e per la necessità conseguente di avere altre sorgenti disponibili in modo più continuativo. Queste energia "su richiesta" potrebbe benissimo essere fornita dalle attuali centrali a gas o altro combustibile fossile, che potrebbero fungere da riserva. Una soluzione alternativa consiste nella dislocazione di una rete di turbine eoliche su vasta scala, in modo tale da suddividere il rischio di rimanere senza vento e quindi senza erogazione di potenza, comprendendo eventualmente

anche centrali solari, considerando anche come, statisticamente, la presenza di sole è legata all'assenza di vento e viceversa. Il problema di questa soluzione è il notevole spazio richiesto per le installazioni, proibitivo per Paesi densamente abitati come per esempio il Giappone. Un'altra possibilità è l'installazione di turbine ad alta quota, dove il vento è abbastanza costante e raggiunge velocità dell'ordine di 160 chilometri orari, pur con l'inconveniente di problemi tecnologici non indifferenti.

In alcuni progetti proposti recentemente si utilizzano palloni aerostatici riempiti di elio, in grado di raggiungere alte quote pur rimanendo collegati al suolo mediante lunghi cavi. Il moto del pallone trascinato dal vento può così essere comunicato a un generatore elettrico. In questo caso, la mancanza di esperienza lascia aperti ancora molti dubbi, tenuto conto che i cavi dovrebbero sopportare una trazione incredibile, soprattutto in caso di tempeste di una certa intensità [31].

Tralasciando questi progetti fantascientifici, l'energia eolica può essere ottenuta anche con impianti semplici, che forniscono da pochi fino a migliaia di watt, di dimensioni e costi contenuti [32, 33]. Se sviluppata diffusamente e su larga scala, una rete di piccoli impianti potrebbe garantire un notevole risparmio energetico, come mostra una semplice stima. In un Paese di circa 50 milioni di abitanti ci sono più di 10 milioni di case; in un milione di esse è possibile ipotizzare che vi siano le condizioni per installare un impianto da 1 kW. Se il vento soffia in media alla giusta velocità, poniamo, per 100 giorni l'anno, in un anno il nostro impianto produrrà 2400 kWh, pari a quasi la metà dell'energia eolica prodotta in Italia nel 2007. Con un prezzo dell'energia di 0,15 euro per chilowattora e tenuto conto di un costo di installazione complessivo di circa un miliardo di euro, ciò si traduce in un risparmio di circa 360 euro all'anno che porta a recuperare la spesa iniziale in un paio di anni circa. Naturalmente queste stime dipendono dalla zona considerata: impianti posti a una certa altitudine sul livello del mare potrebbero avere più vento rispetto ad altri, specialmente nei mesi freddi. Questo schema potrebbe essere utilizzato direttamente per il riscaldamento, risparmiando sul gas, senza quindi immettere l'energia immagazzinata nella rete elettrica. Quando, in un futuro non troppo lontano, le auto saranno o elettriche o ibride si può pensare di utilizzare l'eolico "casalingo" per ricaricare le batterie durante la notte quando le vetture sono in garage.

Come si costruisce una turbina eolica

Come già accennato, lo sfruttamento dell'energia del vento è concettualmente molto semplice, poiché si tratta di collegare l'asse delle pale a un generatore di corrente.

Tuttavia, l'obiettivo di aumentare al massimo l'efficienza e la durata dell'impianto ha portato alla progettazione e alla realizzazione di diverse configurazioni. In primo luogo si possono distinguere le turbine ad asse orizzontale da quelle ad asse verticale.

Le prime sono le più diffuse, e possono raggiungere anche notevoli dimensioni: il primato di grandezza spetta a quella costruita da un'industria tedesca, che sviluppa una potenza massima di 7 megawatt. Per raggiungere un'altezza di quasi 200 metri, essa necessita di una base con un diametro di 126 metri, mentre la lunghezza delle pale è di circa 40 metri. Si tratta ovviamente di modelli adatti all'installazione in siti particolari, per esempio in Artide e in Antartide, dove le condizioni ambientali sono molto sfavorevoli ma c'è una grande abbondanza di vento e non è possibile generare energia elettrica con altri metodi. All'estremo opposto, esistono in commercio turbine a vento anche molto piccole, con potenze ridotte fino a 50 watt, che possono essere utilizzate da privati per alimentare in modo autonomo abitazioni, e addirittura camper, barche a vela e altri piccoli veicoli.

Per tornare ai generatori eolici di grandi dimensioni, occorre sottolineare che le pale delle loro turbine devono essere collegate direttamente al rotore e al generatore elettrico. La progettazione dell'impianto, pertanto, non solo deve rispondere alle necessità di produzione energetica, ma anche soddisfare stringenti requisiti di robustezza e resistenza alle sollecitazioni in presenza di forte vento. Questo spiega le dimensioni imponenti delle strutture e anche i costi elevati, che rendono conto di circa il 20 per cento del totale e che sono imputabili in particolare al trasporto e al montaggio da parte di personale altamente specializzato.

Un'importante caratteristica costruttiva di queste centrali – o almeno di quelle più tecnologicamente avanzate – che aumenta ulteriormente il peso della struttura è la possibilità d'installare una scatola del cambio simile, almeno dal punto di vista concettuale, a quelle delle auto. L'aggiunta di un tale dispositivo è dettata dal fatto che il generatore funziona al meglio quando la velocità delle pale

è costante: un opportuno accoppiamento di ingranaggi consente di ottenere un rapporto di moltiplicazione che trasforma la lenta rotazione delle pale in una rotazione più rapida, adatta al generatore di corrente. Al variare dell'intensità del vento si usano "marce" più alte o più basse, esattamente come avviene in tutti i veicoli spinti da un motore a scoppio. In caso di fortissimi venti c'è naturalmente la possibilità di disaccoppiare il rotore dal resto al fine di evitare incidenti.

Occorre altresì tenere conto che il rotore non si trova mai immerso in un flusso "perfetto": in condizioni di forte vento, le notevoli dimensioni di una tipica torre di sostenimento determinano infatti turbolenze che tendono a diminuire le prestazioni della turbina, oltre ad aumentare lo sforzo sulle pale meccaniche e quindi a diminuirne la durata. Per questo motivo molte turbine ad asse centrale sono montate con le pale controvento: questa soluzione evita le turbolenze dovute alla struttura ma richiede una dose aggiuntiva di sistemi di controllo, molto spesso automatizzati, che orientino costantemente le pale per migliorare le prestazioni e la durata, e per diminuire il tipico rumore prodotto. Accanto a ciò, vengono effettuati studi per individuare, a seconda del sito prescelto, il migliore posizionamento e orientare così il rotore in modo ottimale. Tutti questi accorgimenti non fanno che aumentare i prezzi delle centrali.

Un fattore estremamente importante per ottimizzare la resa dei generatori eolici è l'altezza delle torri: si calcola infatti che, in media, per ogni aumento di 10 metri della quota a cui è posizionato il rotore si abbia un aumento delle prestazioni anche oltre il 20 per cento. Questa circostanza suggerisce di costruire torri quanto più alte possibile e con pale di enormi dimensioni. Un limite intrinseco di simili realizzazioni, tuttavia, è dovuto al fatto che la forza che agisce su una pala nel punto più alto è sensibilmente differente da quella agente su un'altra pala nel punto più basso. Questo, assieme alla perturbazione del vento dovuta alla torre di sostegno, crea sforzi imponenti su tutta la struttura che ne limitano le prestazioni e la durata. Come in ogni realizzazione tecnologica, occorre arrivare a un compromesso tra diverse esigenze, ma l'esperienza in questo caso viene in aiuto: si è notato infatti che questi sforzi sono più elevati quando il numero di pale è pari. In tal caso, infatti, a ogni pala ne corrisponde un'altra lungo lo stesso diametro; di conseguenza, quando una pala si trova



Fig. 3 Tipico aspetto dei generatori eolici con rotori a tre pale
(Foto: Montan Nito)

alla massima elevazione, quella opposta si trova nel punto più basso e le forze agenti agli estremi pongono la struttura sotto sforzo. Per questo motivo, molte delle costruzioni moderne hanno un numero dispari di pale, e più precisamente tre, a differenza dei tradizionali mulini a vento, solitamente dotati di quattro pale (Fig. 3).

Un notevole sforzo tecnologico, da coniugare anche in questo caso con la necessità di contenere i costi, è dedicato ai materiali di costruzione delle pale: la resistenza alle sollecitazioni deve essere tale da impedire che esse si deformino o danneggino in altro modo il generatore eolico, a meno di non montare, come accennato, le pale controvento, in modo che il vento investa la torre di sostegno prima di lambire le pale stesse. Questa soluzione non necessita di pale particolarmente rigide poiché anche in caso di deformazione esse non possono interferire con la torre. Inoltre, non è necessario alcun controllo elettronico poiché il vento le orienta automaticamente. Anche con queste soluzioni, tuttavia, gli inconvenienti non mancano. In primo luogo, le turbolenze create dalla torre ne diminuiscono l'efficienza aumentando il rumore prodotto. Inoltre, le componenti meccaniche hanno una durata ridot-

ta dall'essere sottoposte a sforzi enormi, aggravati dal fatto che le turbolenze sono per loro natura intermittenti. Anche se è meno costosa, questa soluzione ha tuttavia un'efficienza e una durata più limitate e per questo motivo non viene adottata quasi mai.

Alcuni dei problemi costruttivi, economici e d'ingombro delle torri ad asse orizzontale possono essere evitati nei modelli ad asse verticale. La prima ovvia conseguenza di questa soluzione è il fatto che il rotore, la scatola del cambio e il generatore non debbano essere posti a notevoli altezze, come nel caso precedente, ma possono essere installati a terra. Non è quindi necessario costruire una torre massiccia ed è più facile effettuare le ispezioni quando necessario. A questi vantaggi che riguardano la struttura, si aggiunge il fatto che le pale verticali possono funzionare anche a una velocità del vento inferiore, ovvero a partire da 10 chilometri orari e che il rumore prodotto è inferiore a quello tipico delle pale orizzontali. Per contro, l'efficienza di questa soluzione è inferiore, inoltre gli sforzi che agiscono sulle pale verticali sono enormi e ne riducono enormemente la durata. Tali inconvenienti fanno sì che una simile soluzione sia adatta a contesti particolari, sia naturali, come nel caso degli altipiani, sia artificiali, come nel caso delle alte costruzioni (Fig. 4).

Il vento che si propaga vicino al suolo tende infatti a risalire quando incontra un ostacolo: se il generatore è situato in cima potrà usufruire della corrente ascensionale che si è creata naturalmente. Molto studiata al momento è la possibilità di alloggiare turbine verticali sui tetti dei grattacieli, appunto per sfruttare queste proprietà del vento e gli spazi che sarebbero altrimenti inutilizzati, producendo un minimo impatto ambientale. Pensando alle tante costruzioni che in Italia si sviluppano su altipiani e colline dove il vento è forte e costantemente presente, specialmente nei mesi freddi, viene naturale pensare di installare questo tipo di centrali, magari non di alta potenza ma a costi contenuti, che possano dare un contributo importante alla produzione di energia utilizzando risorse e lavoro del territorio.

Queste brevi note non hanno certo la pretesa di essere esaustive dell'argomento ma intendono dare un'idea della tecnologia impiegata in questi "mulini a vento" moderni. Il tutto ha a che vedere con aerodinamica, tecnologie meccaniche, materiali resistenti e leggeri: in altri termini una buona torre eolica possiede tanta tecnologia molto simile a quella di una moderna auto di Formula 1. Un Paese come l'Italia, leader riconosciuto nel campo della costruzione di auto, moto



Fig. 4 Generatore ad asse verticale da 20 kW sviluppato dalla Hochschule Bremerhaven per la stazione Neumayer del Dronning Maud Land, in Antartide (Foto: Hannes Grobe)

ma anche aerei, barche ed elicotteri, potrebbe con piccoli sforzi e modifiche creare le condizioni per un'“industria del vento” all'avanguardia. Anche il problema della natura intermittente del vento, in qualche modo, può essere risolto, per esempio immagazzinando nell'idrogeno l'energia in eccesso prodotta in presenza di forti venti. Quando invece il vento viene a mancare, è possibile utilizzare l'idrogeno prodotto in centrali convenzionali bruciandolo al posto del metano (se conveniente da un punto di vista economico), oppure installando centrali solari, come discuteremo in seguito.

Probabilmente il problema maggiore delle centrali eoliche è il fatto che alterano il paesaggio soprattutto dal punto di vista visivo: occorrono, infatti, molte di queste torri per poter garantire una produzione considerevole di energia. Questa circostanza ha attirato – e continua ad attirare – notevoli critiche sull'installazione dei generatori eolici, anche da parte di personaggi pubblici conosciuti come ambientalisti; simili considerazioni valgono anche per le centrali solari. Si tratta, com'è facile comprendere, di trovare un compromesso tra la necessità di una maggiore produzione di energia

da una parte, possibilmente ricavata da fonti rinnovabili, e le legittime considerazioni sull'impatto sull'ambiente e sul paesaggio dall'altra. Ma si tratta anche e soprattutto di ricondurre i problemi alle loro reali dimensioni, scegliendo, come spesso si fa, il male minore. Dopotutto, siamo disposti ad accettare di buon grado molte infrastrutture – autostrade, linee elettriche e quant'altro – che ci sono utili, anche se rendono il paesaggio assai differente da quello che si poteva godere nel nostro Paese 100 o 200 anni fa. Le centrali eoliche e quelle solari, per quanto invadenti, hanno il vantaggio di poter essere smantellate facilmente e senza la necessità di una bonifica del territorio circostante, qualora dovesse essere disponibile un'alternativa migliore.

Solare

Per l'energia solare vale un discorso analogo a quello dell'eolico: il sole è una risorsa disponibile a tutti, anche se non è così immediato capire come si possa convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica.

In effetti, come funziona un pannello fotovoltaico? Per rispondere a questa domanda dobbiamo prima introdurre un fenomeno fisico, in realtà molto semplice, la cui spiegazione teorica rappresentò una vera rivoluzione per i principi della fisica classica e uno dei passi fondamentali verso la formulazione della moderna meccanica quantistica: l'effetto fotoelettrico. Già nel XIX secolo era stato osservato, in particolare dal fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), come si potesse verificare un'emissione di elettroni da un metallo quando questo veniva investito dalla luce. In effetti già allora si sapeva che la luce non è altro che una forma di onda elettromagnetica, e più precisamente quella la cui frequenza è compresa nel cosiddetto spettro visibile. L'occhio umano infatti riesce a percepire le diverse frequenze della radiazione come colori, ma solo quelle comprese tra il rosso, che corrisponde alla frequenza minima, e il violetto, che corrisponde alla frequenza più alta. Alcuni animali, invece, possono vedere anche alcune frequenze nell'infrarosso. Le onde per le telecomunicazioni hanno la stessa natura della luce visibile ma possiedono frequenza più bassa mentre per esempio i raggi X sono a frequenza molto più alta.

Fin dai tempi di James Clerk Maxwell (1831-1879), il padre fondatore della teoria classica dell'elettromagnetismo, si sapeva anche che un'onda elettromagnetica è formata da un campo elettrico e da un campo magnetico, entrambi variabili nel tempo, che si propagano "autoalimentandosi": il campo elettrico variabile produce un campo magnetico variabile che a sua volta produce un campo elettrico variabile e così via. Era ben noto anche come queste onde potessero interagire con gli elettroni e i nuclei dell'atomo, poiché anche questi producono campi sia elettrici sia magnetici.

Sulla base della teoria elettromagnetica classica e della propria intuizione ci si aspettava una semplice legge di proporzionalità: quanto maggiore era l'intensità della luce, tanto più numerosi avrebbero dovuto essere gli elettroni emessi. Gli esperimenti mostrarono in realtà che le cose non stanno affatto così. Il numero e l'energia degli elettroni emessi dipende dalla frequenza della luce (cioè dal colore) e dal materiale che assorbe la luce. In alcuni casi, una luce di grande intensità di una certa frequenza incidente su particolari oggetti non portava ad alcuna emissione, mentre basse intensità di luce ma di frequenza maggiore producevano l'emissione di elettroni. Questo fenomeno fu spiegato agli inizi del secolo da un giovanissimo Albert Einstein, grazie a una teoria che gli valse il premio Nobel nel 1921 (Fig. 5). Egli postulò che la luce avesse una doppia natura, ondulatoria (come si sapeva già) e corpuscolare, e che l'energia trasportata dalla luce o da queste particelle, chiamate fotoni e dotate di massa nulla, fosse proporzionale alla sua frequenza.

Il fenomeno dell'estrazione di un elettrone dall'atomo di materiale su cui incide un fotone può essere pensato come la collisione di due palle da biliardo. Poiché però l'elettrone è inizialmente legato all'atomo con una certa energia, occorre che il fotone incidente possieda un'energia maggiore di questo valore: quando viene superata tale soglia, l'elettrone può essere espulso con un'energia cinetica direttamente proporzionale all'energia del fotone incidente. Inoltre, il numero di fotoni emessi è proporzionale al numero di fotoni incidenti. Con le leggi formalmente semplici di Einstein, i fatti sperimentali osservati risultano perfettamente spiegati.

Quindi, in definitiva, l'emissione dipende dal materiale che assorbe la luce e dall'energia della radiazione. Per alcuni materiali, tuttavia, può succedere che gli elettroni vengano estratti dall'a-

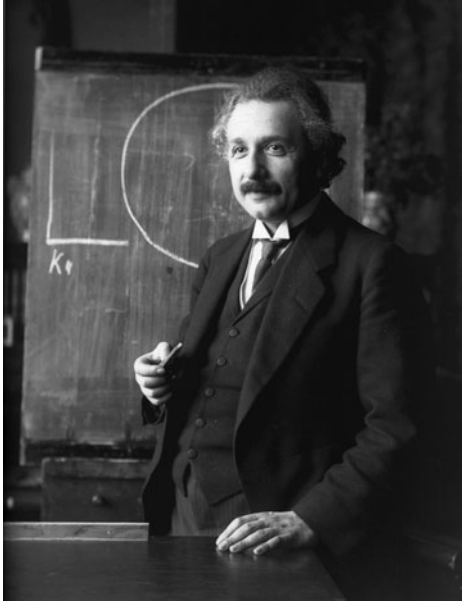


Fig. 5 Albert Einstein nel 1921, anno in cui ricevette il Premio Nobel per la fisica per il fondamentale lavoro sull'effetto fotoelettrico (Historisches Museum Bern)

tomo ma che non abbiano energia sufficiente per essere espulsi dal materiale stesso. In questi casi gli elettroni non sono liberi, ma poiché essi si muovono da una parte all'altra del materiale, si determina una differenza di potenziale tra diversi punti. Si può così verificare una distribuzione disomogenea di cariche elettriche: la presenza di più elettroni in alcune zone, e quindi di più carica negativa rispetto ad altre in cui prevalgono le "lacune" lasciate dagli stessi elettroni e le cariche positive dovute agli atomi ionizzati, porta all'instaurarsi di una differenza di potenziale, come quella presente tra i poli opposti di una batteria.

Questo effetto, detto fotovoltaico, che può essere sfruttato per produrre una corrente elettrica, è alla base dei pannelli fotovoltaici (Fig. 6).

Il primo pannello fotovoltaico fu realizzato dall'inventore statunitense Charles Fritts nel 1883, quindi ben prima della comprensione del fenomeno fisico che ne permetteva il funzionamento. Il dispositivo, realizzato in selenio e oro, aveva un'efficien-

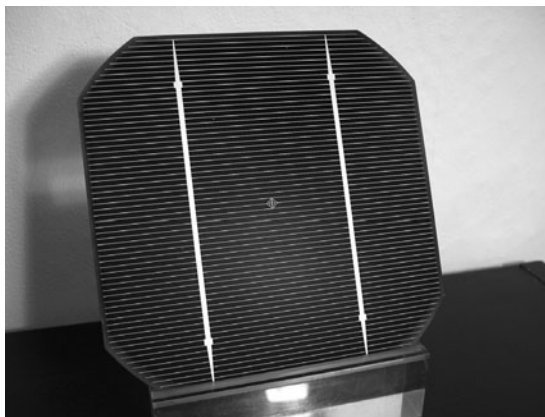


Fig. 6 Pannello fotovoltaico al silicio (Foto di: Stephan Kambortaki)

za di conversione della luce incidente in elettricità di circa l'1 per cento, molto limitata, quindi, ma sufficiente per dimostrare la possibilità di sfruttare la radiazione luminosa come fonte energetica.

Chiaramente, uno dei principali obiettivi della ricerca sui pannelli fotovoltaici è stato, negli ultimi decenni, quello di ottenere quanta più energia elettrica possibile dalla luce, ovvero in poche parole, di massimizzare l'efficienza delle celle, grazie alla sperimentazione di diversi materiali. Attualmente, si raggiungono valori del 45 per cento per le realizzazioni di laboratorio, mentre per i pannelli disponibili sul mercato non si riesce a superare di molto la barriera del 10 per cento.

Come si può ben intuire da questi semplici dati, passare dai risultati di laboratorio a dispositivi da installare sui tetti delle case non è affatto semplice. I pannelli venduti sul mercato devono rispondere ad alcune specifiche tecniche di cui in laboratorio non ci si preoccupa affatto: in particolare, devono resistere alle variazioni atmosferiche nei diversi periodi dell'anno, oltre che alla grandine, all'eccessivo calore, all'umidità, alla ruggine e al vento. Inoltre, devono durare quanto più a lungo possibile per ammortizzare i costi. D'altra parte è possibile che il progresso tecnologico e la diffusione di questi dispositivi possa portare a sensibili incrementi della loro efficienza e della loro durata, e al contempo a una diminuzione dei prezzi, un po' come è successo con i computer, per i

quali le prestazioni sono aumentate sensibilmente nel corso degli anni senza incidere sui costi, che si sono invece abbassati grazie alla competizione tra varie industrie.

Una strada diversa per lo sfruttamento dell'energia dei raggi solari, è quella del solare termico, che si basa sul riscaldamento diretto dell'acqua che viene poi utilizzata per i radiatori o per usi sanitari. Il solare termico ha però l'inconveniente di rendere disponibile una grande quantità di acqua in estate, quando non ve ne è grande necessità, e meno in inverno, quando ce ne sarebbe più bisogno.

Questa caratteristica può tuttavia essere modificata utilizzando particolari sistemi o pompe di calore in grado di raffreddare gli ambienti in estate e riscaldarli in inverno sfruttando l'energia del sole in combinazione con sistemi ausiliari consentendo dei risparmi considerevoli. Studi sono in corso anche per ottenere dei pannelli fotovoltaici e termici combinati in modo da poter sfruttare i vantaggi di entrambi.

Ma quali sono le reali potenzialità dell'energia solare? In media, la Terra riceve circa 200 watt di potenza per metro quadrato. Tenuto conto della superficie complessiva del nostro pianeta, si può facilmente stimare che il Sole fornisce una quantità di energia 100.000 volte superiore all'attuale consumo globale umano. Considerando inoltre che un pannello fotovoltaico ha un'efficienza di conversione di circa il 10 per cento, in linea di principio sarebbe possibile ottenere dal Sole tutta l'energia che ci serve, anche se ciò comporterebbe ricoprire con pannelli una buona parte della superficie della Terra (mare compreso), con costi inimmaginabili.

Per fare un confronto, per produrre l'energia di una centrale nucleare utilizzando pannelli fotovoltaici con una efficienza di circa 27 watt per metro quadrato occorrerebbero 4.000 ettari di deserto. Il costo per i soli pannelli si aggirerebbe sui 2,5 miliardi di euro, confrontabile quindi con l'investimento necessario per una centrale nucleare. Si tratta di un costo teorico, tuttavia, che potrebbe lievitare enormemente e in breve tempo, specialmente per le centrali nucleari, per l'opposizione delle popolazioni che vivono intorno al sito prescelto, come ha insegnato l'esperienza con la centrale statunitense di Shoreham. Inoltre, la manutenzione degli impianti nei deserti, tesa soprattutto a evitare che i pannelli vengano rovinati o seppelliti dalle tempeste di sabbia, potrebbe avere un costo non indifferente.

Un progetto interessante in questa direzione è la centrale sola-

re di Solana, in Arizona, che, occupando un'area di 7 chilometri quadrati, potrà generare circa 280 MW di potenza e soddisfare così il fabbisogno di energia elettrica di 70.000 abitazioni [34]. L'investimento previsto è di oltre un miliardo di dollari, vale a dire il doppio di quello occorrente per la costruzione di una centrale nucleare di uguale potenza. Ciò implica che il prezzo dell'energia elettrica prodotta sarà di circa 14 centesimi di dollaro al kWh contro i 9 centesimi al kWh che la popolazione paga attualmente per l'energia prodotta da una centrale nucleare vicina. Naturalmente questi sono i costi diretti, che non tengono conto cioè dell'investimento in termini di posti di lavoro, stimati in circa 1.500 per la costruzione e oltre 10.000 per le sovrastrutture. Per compensare la differenza di prezzi sono stati studiati particolari tipi di tassazione; in ogni caso la società costruttrice prevede un guadagno di quattro miliardi di dollari in 30 anni e quindi circa otto anni per ripagare l'investimento iniziale.

Un progetto già avviato è invece quello del Parco solare di Nellis, il più grande del Nord America fino al 2009. Situato all'interno della base aerea di Clark County, nel Nevada, è formato da 70.000 pannelli fotovoltaici che forniscono una potenza di picco di 13 megawatt (Fig. 7). Per quanto riguarda il nostro Paese, un proget-



Fig. 7 Il Parco solare di Nellis: 70.000 pannelli fotovoltaici nel deserto del Nevada (Foto: U.S. Air Force - Nadine Y. Barclay)

to interessante a scopo dimostrativo è stato avviato nel 2001 a Priolo, in provincia di Siracusa, ma è stato successivamente abbandonato.

L'alternativa agli impianti di grandi dimensioni in luoghi sperduti è, come già ipotizzato per l'eolico, la diffusione di impianti privati occupando per esempio i tetti delle abitazioni.

Considerando sempre 10 milioni di edifici e 10 metri quadrati per ogni casa disponibili per i pannelli fotovoltaici, ottenibili con un investimento dell'ordine del miliardo di euro, la potenza erogata arriva a circa 270 MW in un anno, pari a circa un terzo di quella fornita da una centrale nucleare, con importanti ricadute occupazionali ed economiche. Queste cifre potrebbero rapidamente aggiungere valori più competitivi sul mercato, grazie agli sviluppi tecnologici se, per esempio, oltre ai tetti si riuscissero a sfruttare le facciate delle case o se si rendessero disponibili sul mercato pannelli più efficienti nell'estrazione di energia.

Come l'eolico, anche il solare dipende dalle condizioni meteorologiche, e soffre quindi di una relativa discontinuità di erogazione. Questo problema può essere superato o producendo idrogeno con l'energia ricavata o immagazzinando l'energia in sali particolari che fondono se portati ad alta temperatura e perdono calore lentamente (in oltre sei ore) e quindi possono far funzionare le turbine nelle ore notturne garantendo così un'erogazione di energia costante.

La produzione di idrogeno

Come abbiamo visto, alcuni approcci alla produzione di energia, solare e vento per esempio, hanno come inconveniente la dipendenza dalle condizioni atmosferiche: questo punto debole è ampiamente sottolineato da chi propende per altri sistemi di produzione energetica, come il nucleare. Una soluzione a tale problema è alternativa a quelle già discusse nei precedenti paragrafi è la produzione di idrogeno, che può essere immagazzinato e utilizzato successivamente in un'ampia varietà di applicazioni, soprattutto nell'alimentazione di veicoli "puliti" ed efficienti che potrebbero rappresentare, secondo molti osservatori, il futuro della mobilità pubblica e privata.

Prima di cominciare questa breve trattazione, tuttavia, occorre sgombrare il campo da un malinteso: l'idrogeno non è una fonte di

energia – non si trova infatti in natura nella forma molecolare –, bensì un vettore energetico, cioè uno “contenitore chimico di energia” che occorre prima produrre, per esempio in una centrale nucleare o solare, per poterlo poi sfruttare come combustibile in situazioni meno comode, come nel caso dell’alimentazione di veicoli.

A ogni modo, l’interesse per la produzione di idrogeno è condiviso anche da chi favorisce il nucleare per la produzione di energia: per il nucleare, infatti, vale un po’ il principio opposto a quello delle energie alternative, poiché le centrali funzionano in modo più efficiente se la domanda di energia è costante. Com’è noto, non è questo il nostro caso, poiché il fabbisogno di energia elettrica cala notevolmente durante le ore notturne, in agosto o nei periodi di festa, quando le industrie sono ferme. Viceversa, si registrano periodi di picco nei giorni lavorativi o quando in estate alla piena attività lavorativa si somma l’enorme consumo dei condizionatori d’aria, ormai onnipresenti nelle abitazioni private come negli uffici. Lo spauracchio per molte nazioni è quello di andare incontro a un *blackout* elettrico come quello verificatosi in Italia nel 2003 per i danni al sistema di distribuzione dovuto ad alcuni eventi atmosferici. Questi incidenti, avvenuti in Svizzera, si propagarono in tutta la penisola grazie a un sistema di distribuzione di elettricità che probabilmente è stato concepito pensando di favorire il Nord e le sue industrie in caso di mancanza di potenza, e quindi assorbendo energia prodotta nel Sud. Ciò provocò un effetto a catena, e tutto il Paese, tranne la Sardegna, restò senza energia per diverse ore. Poiché la maggior parte dell’energia elettrica è fornita da centrali non nucleari, spegnerle è stato relativamente semplice. Nel caso di impianti nucleari, per contro, l’improvvisa caduta di domanda richiede l’arresto della produzione di energia secondo un ben preciso protocollo in grado di garantire la sicurezza, un’operazione, questa, sicuramente più complessa rispetto al caso delle centrali convenzionali.

Attualmente, sono in fase di sperimentazione centrali nucleari, soprattutto tra quelle della IV generazione, che sfruttano la tecnologia ad alta pressione, previste per il 2030, in grado di produrre idrogeno quando c’è meno domanda di elettricità. Questo tipo di centrali, infatti, ha un intervallo di temperatura di funzionamento compreso tra 850 e 1.000°C circa, in corrispondenza delle quali, in opportune condizioni di pressione, è possibile ottenere l’idrogeno dalla scissione dell’acqua. Naturalmente, occorre ricordare che l’idrogeno è

altamente esplosivo in presenza di ossigeno. Le esplosioni che causarono l'apertura del tetto della centrale di Chernobyl, per esempio, furono dovute alle alte temperature, che crearono un'alta pressione dell'acqua di raffreddamento (simile allo scoppio di una pentola a pressione) e all'idrogeno prodotto, che esplose a contatto con l'ossigeno. Una notevole produzione d'idrogeno si verificò anche nell'incidente di Three Mile Island. Fortunatamente solo una piccola parte esplose nella costruzione di contenimento, altrimenti l'incidente avrebbe avuto le stesse proporzioni di Chernobyl.

A ogni modo, accoppiato alla produzione di energia nucleare, il costo per la produzione dell'idrogeno potrebbe essere competitivo se non vantaggioso rispetto a mezzi chimici attualmente utilizzati, il che renderebbe questa opzione assai vantaggiosa, almeno stando al giudizio di alcuni esperti del settore. Occorre ricordare che le centrali nucleari di IV generazione dovrebbero essere più sicure di quelle attuali: detto in altro modo, ciò significa che le centrali di III generazione sono relativamente lontane dall'essere sicure al 100 per cento. Inoltre questo nuovo tipo di reattori dovrebbe essere più efficiente, consumare meno combustibile e produrre meno scorie radioattive. I tempi previsti per tali impianti, come abbiamo visto, coincidono con quelli previsti per l'entrata in funzione delle future centrali nucleari in Italia, il che aumenta le perplessità su questa scelta. Le alte temperature possono essere raggiunte anche in centrali solari o eoliche.

Dal punto di vista chimico-fisico, occorre ricordare che per ottenere idrogeno è possibile adottare diverse metodi. Il primo è la produzione diretta dall'acqua. Si tratta però di una via antieconomica, poiché la temperatura necessaria per dissociare la molecola dell'acqua in idrogeno e ossigeno è molto alta: a 2200°C circa il 3 per cento delle molecole di H_2O sono dissociate in vari componenti di idrogeno e ossigeno (H , H_2 , O e O_2); se si innalza la temperatura a 3.000°C la percentuale di dissociazione è di circa il 50 per cento. Questi livelli di temperatura sono molto elevati e determinerebbero problemi di sicurezza non indifferenti, per esempio, nelle centrali nucleari. L'efficienza di produzione può essere aumentata anche alle più basse temperature, in ogni caso, mediante l'utilizzo di opportuni catalizzatori.

Il principale metodo alternativo di produzione dell'idrogeno è l'elettrolisi, che permette la dissociazione dell'acqua mediante il passaggio di corrente elettrica. L'elettrolisi è economicamente conve-

niente quando vi è una produzione di elettricità in eccesso, come potrebbe accadere, per esempio, nelle centrali eoliche in presenza di forti venti per lungo tempo. In tal caso la rete potrebbe non essere in grado di assorbire completamente l'energia prodotta.

Va da sé che produrre idrogeno ha un costo notevole, a meno che il calore non venga ottenuto in modo conveniente, in una centrale nucleare oppure mediante la concentrazione di raggi solari in particolari impianti, di cui esistono già prototipi finanziati dall'Unione Europea, come l'impianto Hydrosol 2 ad Almeria in Spagna. In questo caso, per la produzione si pensa di sfruttare opportune reazioni termochimiche in presenza di un catalizzatore.

Un metodo alternativo più efficiente prevede l'utilizzo del metano come materia prima. Com'è noto, infatti, il metano ha formula chimica CH_4 : ogni molecola ha quattro atomi di idrogeno e uno di carbonio. In opportune condizioni e a temperature dell'ordine di 500°C è possibile far reagire il metano con l'acqua: dalla reazione di una molecola di CH_4 e una molecola di H_2O si ottengono come prodotti una molecola di monossido di carbonio (CO) e tre molecole di idrogeno (H_2). Una reazione secondaria tra CO e H_2O permette poi di ottenere una molecola di biossido di carbonio (CO_2) e un'altra molecola di H_2 .

Questo metodo in particolare viene attualmente studiato in Australia, grazie a un'ingegnosa fonte di energia che si rifà essenzialmente agli specchi ustori grazie ai quali Archimede di Siracusa (287-217 a.C.), secondo la tradizione, avrebbe concentrato i raggi solari sulle le navi romane che assediavano la città siciliana durante la Seconda guerra punica, incendiandole (Figura 8 [35-36]).

Allo stesso modo, un progetto del National Solar Energy Centre (NSEC) australiano, che ha sede a Newcastle, nel Nuovo Galles del Sud, utilizza i raggi solari concentrati su una miscela di metano e acqua da specchi posti su una torre [36]. La temperatura raggiunta è sufficiente a indurre la produzione di idrogeno.

A questo punto ci si potrebbe porre una domanda: dato che il metano è un combustibile, qual è il vantaggio del trasformarlo in idrogeno? In questo caso si sfrutta l'energia della radiazione solare per ottenere molecole con un contenuto di energia chimica maggiore: infatti rispetto al metano l'idrogeno ha circa il 25 per cento in più di energia per chilogrammo, percentuale che rappresenta appunto l'energia solare immagazzinata. Questi e altri pro-



Fig. 8 Gli specchi ustori di Archimede incendiano le navi romane che assediano Siracusa durante la Seconda guerra punica in un'illustrazione dell'*Opticae thesaurus* di Al-Hazen (Biblioteca civica di Monaco di Baviera)

getti sono molto in voga in quei Paesi, come Australia, in cui l'esposizione alla radiazione solare è molto elevata e costante.

In definitiva, l'idrogeno suscita grande interesse dal punto di vista sia scientifico sia economico, ed è facile prevedere che rivestirà un ruolo importante nei trasporti come nelle industrie del futuro. Prima che l'economia dell'idrogeno prenda effettivamente piede, tuttavia, occorrerà risolvere alcuni problemi fondamentali che riguardano la sua produzione. Allo studio vi sono anche metodi pionieristici che sfruttano, per esempio, il processo di fermentazione da parte di particolari batteri, alghe o altri microrganismi.

Il mare

Un'altra fonte di energia naturale è costituita dal movimento del mare, in forma di onde o di maree [37]. Anche in questo ambito la ricerca è solo agli inizi, come per il solare e l'eolico, con il quale



Fig.9 La centrale a energia mareale sull'estuario del fiume Rance, in Bretagna (Francia): è il più grande impianto di questo tipo del mondo (Foto: DANI 7C3)

condivide la sperimentazione di turbine di varia forma e orientazione in progetti pilota avviati in varie parti del mondo.

Storicamente, la prima centrale venne costruita nel 1966 sull'estuario del fiume Rance, in Francia. In più di 40 anni di operatività essa ha fornito circa 600 GWh l'anno di elettricità, ripagando ampiamente il costo iniziale, solitamente molto elevato e poco attraente per gli investitori privati. L'installazione, tra l'altro, costituisce un'attrazione turistica per circa 200.000 visitatori all'anno (Fig. 9).

Dal punto di vista tecnico, si tratta di realizzare una serie di sbarramenti che incanalano l'acqua in modo da indirizzarla verso delle turbine. Tra i pregi dello sfruttamento dell'energia del mare si annoverano sicuramente la disponibilità pressoché infinita, l'impatto ambientale limitato, la bassa manutenzione richiesta e la notevole sicurezza, dal momento che non occorre creare invasi artificiali come nel caso delle dighe delle centrali idroelettriche. Un altro aspetto positivo è la prevedibilità delle maree, che com'è noto, sono dovute all'attrazione gravitazionale tra la Terra e la Luna.

Nel caso delle onde, l'impianto più ingegnoso è quello inaugurato a Aguçadoura, in Portogallo. Consiste infatti in un enorme

“serpente” snodabile che segue il movimento delle onde, comunicandolo alle turbine che generano elettricità.

La sinergia con la ricerca di base potrebbe, in questo caso come in altri, portare vantaggi importanti sia per la scienza sia per le applicazioni tecnologiche. L'esperienza NEMO proposta dai fisici del Laboratorio nazionale del Sud dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e da diverse università e centri di ricerca italiani e stranieri, cerca risposte sulla formazione e sull'evoluzione dell'universo mediante la misura di particelle estremamente energetiche, i neutrini, che provengono da galassie distanti da noi (in teoria dal centro dell'universo, se una tale definizione è possibile). I neutrini, particelle di carica nulla e massa piccolissima o nulla possono percorrere enormi distanze senza subire deviazioni e senza essere assorbite. Lo studio di queste sfuggenti particelle potrebbero portare importanti informazioni di eventi catastrofici accaduti anche miliardi e miliardi di anni fa e in punti dell'universo lontanissimi da noi, quindi, potenzialmente, anche sull'origine e sull'evoluzione dell'universo. Per questo motivo, NEMO si propone di misurare i neutrini che hanno attraversato buona parte del cosmo e provengono dall'emisfero sud della Terra. L'attraversamento da parte a parte del nostro pianeta riduce in qualche modo il “rumore”, ovvero l'insieme dei segnali prodotti da altre particelle che vengono assorbite dalla crosta terrestre. Un problema è dato però dai neutrini che provengono dal Sole, caratterizzati da un'energia molto più bassa di quella di interesse ma in numero molto maggiore, tale da coprire il segnale dei neutrini energetici. Per schermare questi neutrini solari si è pensato di immergere i rivelatori nelle profondità marine e a tale scopo è stato scelto il mare al largo di Porto Palo, in Sicilia, in una delle zone più profonde del Mediterraneo.

Un obiettivo scientifico così importante, ovviamente, dev'essere supportato da uno sforzo tecnologico adeguato, se si pensa che i rivelatori di NEMO devono essere collocati a profondità di circa 3.000 metri. In particolare, il progetto prevede la deposizione di un'enorme torre a 3.500 metri di profondità, in condizioni di pressione estreme. Ai fini dell'estrazione di energia dal mare, tuttavia, le informazioni più importanti sono quelle che riguardano correnti e variazioni di temperatura.

Ma quanta energia è possibile estrarre dal mare? In teoria molta più di quella necessaria alla totalità delle attività umane, ma in pra-

tica le difficoltà logistiche e tecnologiche sono enormi, senza tener conto che qualunque metodo, anche il più ingegnoso, deve giocoforza essere competitivo dal punto di vista economico.

Si calcola, per esempio, che in acque tropicali sia possibile estrarre oltre un terawatt di energia dalla differenza di temperatura di circa 20°C tra la superficie e una profondità di circa 1.000 metri. Il problema è come estrarre tale energia con mezzi economici. Alcune soluzioni sono state studiate negli anni Settanta negli Stati Uniti e furono messe in funzione alcune centrali che generavano fino a 50 chilowatt di potenza. Recentemente la Lockheed e la Marina degli Stati Uniti hanno ripreso tali progetti di nuova concezione.

Un'ultima risorsa a cui è opportuno accennare è la differenza di salinità tra l'acqua dei fiumi e quella del mare, che in alcuni specifici siti potrebbe garantire un'erogazione di potenza dell'ordine dei 200 GW. Anche in questo caso, purtroppo, la tecnologia è ancora agli albori, anche se importanti progressi si stanno registrando, per esempio, in Norvegia.

Biomasse e trattamento dei rifiuti

Nel mondo ancora oggi circa un miliardo di persone, tra cui molti bambini, non hanno cibo sufficiente per la sopravvivenza. A dispetto di questo enorme problema alimentare, sta prendendo piede da alcuni anni la produzione di biocombustibili, in primo luogo di etanolo, dal mais o dalla canna da zucchero [38].

Per quanto questa produzione di combustibili possa essere economicamente conveniente e caratterizzata da un impatto ambientale inferiore rispetto ai combustibili fossili, i terreni sottratti alle normali coltivazioni porteranno inevitabilmente a una minore produzione agricola ai fini alimentari, con conseguente aumento dei prezzi all'ingrosso dei cereali e del costo della vita. Considerando inoltre che i biocombustibili possono dare un contributo molto limitato alla produzione complessiva di energia, il loro futuro non pare particolarmente promettente.

Nella stessa ottica di utilizzare gli scarti per produrre energia, un risultato interessante è stato ottenuto recentemente utilizzando un particolare tipo di batterio, l'*Escherichia coli* mediante particolari modificazioni genetiche, che ha la proprietà di trasformare

gli scarti dell'agricoltura in biocombustibile [39]. Oltre a essere, secondo le stime, circa l'85 per cento meno inquinante del diesel derivato dal petrolio, tale soluzione, sfruttando materiali di origine vegetale che non entrerebbero in ogni caso nel consumo alimentare umano, non sottrarrebbe terreno alle coltivazioni agricole. Inoltre, dovrebbe garantire una produzione di gas serra più limitata rispetto per esempio ai metodi basati sulla produzione della canna da zucchero. Importanti giganti del petrolio stanno investendo in questa linea di ricerca per produrre carburante per il trasporto e si pensa di aprire una linea di produzione a scopo dimostrativo negli Stati Uniti già nel 2010.

Un'altra alternativa interessante è costituita da biocarburanti prodotti dalle alghe. Si potrebbe pensare di convertire saline abbandonate, soprattutto per motivi economici, in coltivazioni di particolari alghe dalle quali estrarre biocarburante con una buona efficienza. Naturalmente queste trasformazioni dovrebbero avvenire nel rispetto dell'ambiente e preservando al contempo anche l'aspetto paesaggistico della zona interessata, solitamente di grande valore.

Le saline di Trapani, (figura 10), per esempio, costituiscono una riserva naturale molto importante che, se trasformata per la coltivazione delle alghe, diventerebbe di colore rosso e con diverse caratteristiche che potrebbero non essere d'attrattiva per gli uccelli che sostano durante le migrazioni annuali, senza contare che anche la flora esistente verrebbe modificata da tale trasformatio-



Fig. 10 Salina a Trapani (Foto: Tato Grasso)

ne. Si pensa quindi che sarebbe più opportuno coltivare alghe in siti meno pregevoli, cosa resa possibile d'altra parte dalle caratteristiche di questi organismi vegetali [40].

Le alghe, per concludere, potrebbero rappresentare la terza generazione di possibili fonti di biocarburanti. Se tale tecnologia dovesse prendere piede, abbandonata la prima generazione di zuccheri estratti dal mais per produrre etanolo, si potrebbe passare dalla seconda generazione di cellulosa e scarti di piante per lo stesso combustibile alla produzione di biodiesel dalle alghe. Da sottolineare che il biodiesel ha numerosi vantaggi rispetto all'etanolo in termini di sicurezza.

A parte l'ovvio vantaggio delle alghe di utilizzare siti non altrimenti utilizzabili per l'agricoltura e quindi non in competizione con la regolare produzione di prodotti agroalimentari, esse possiedono diverse caratteristiche che le rendono interessanti. La più importante è la loro capacità naturale di produrre e immagazzinare lipidi simili a quelli trovati in oli vegetali. Inoltre le alghe, se coltivate in stagni, catturano CO_2 e luce solare trasformandola in ossigeno e biomassa, il che le rende particolarmente interessanti da un punto di vista ecologico. Sfortunatamente quando il biocarburante viene bruciato il CO_2 torna nell'ambiente. Quindi il bilancio di CO_2 è, in linea di principio, nullo ma bisogna notare che bruciando biocarburante si evita il consumo di derivati del petrolio e quindi, di fatto, si diminuisce la quantità di CO_2 immessa nell'ambiente.

Naturalmente il maggior sforzo scientifico attuale è la selezione delle alghe più adatte alla produzione di oli e la loro trasformazione in biocarburanti in modo efficiente ed economico. La ricerca sulle alghe non è una reale novità e solitamente torna di moda quando il prezzo del petrolio cresce. Nell'immediato futuro, è prevedibile che tali prezzi non scenderanno ai livelli raggiunti prima della prima crisi petrolifera della fine degli anni Sessanta, e lo sfruttamento delle alghe potrebbe divenire una realtà consolidata considerando anche lo sforzo profuso in questo campo dalla ricerca d'Oltreoceano.

Recentemente una compagnia aerea statunitense ha effettuato il primo volo commerciale di test utilizzando biocarburante ottenuto dalle alghe. Finanziamenti sono stati erogati dall'Aeronautica militare americana per progetti di individuazione delle alghe più adatte per produrre carburante per aerei. Per alcune di esse si è già

visto che i composti prodotti sono chimicamente simili a quelli trovati in alcuni tipi di kerosene utilizzati dai velivoli militari. Il DOE (Dipartimento dell'energia) degli Stati Uniti stima che dalle alghe si possa estrarre 100 volte più olio rispetto a qualsiasi coltura terrestre, inclusa la soia. Per ottenere risultati economicamente convenienti occorrono in ogni caso enormi investimenti e grandi aree disponibili. Ma nel giro di alcuni anni quella delle alghe potrebbe diventare un'opzione valida: soprattutto in Paesi, come l'Italia, che dispongono di molti chilometri di coste si potrebbe assistere alla produzione di milioni di litri di biocarburanti.

Un discorso assai differente vale invece per lo smaltimento di rifiuti, un problema da affrontare seriamente e urgentemente per evitare situazioni come la crisi dei rifiuti in Campania, o come quelle che si presentano in molte altre città nei Paesi in via di sviluppo. Se non si troveranno soluzioni adeguate, il mondo si troverà presto di fronte a una situazione critica, come illustrato con grande efficacia dal lungometraggio di animazione *Wall-e*.

Purtroppo il metodo di smaltimento dei rifiuti più utilizzato è ancora la triturazione e il compattamento nei mezzi di raccolta e lo stoccaggio nelle discariche che, una volta raggiunto il limite di capienza, vengono abbandonate all'aria aperta, costituendo così una minaccia importante alla salute. Un palliativo potrebbe consistere nel seppellire i rifiuti compattati, recuperando spazio per altre destinazioni, e anche nel recuperare il gas metano che viene prodotto dalla macerazione dei rifiuti mediante un opportuno sistema di tubazioni.

Un'altra soluzione è la combustione dei rifiuti ad alta temperatura negli inceneritori: con il calore sviluppato è possibile produrre vapore in grado di muovere turbine per la generazione di elettricità. L'impatto ambientale del processo è tale, tuttavia, che non è possibile considerare l'incenerimento un metodo auspicabile per tutti i tipi di rifiuti. La via da seguire, in questo caso, è sicuramente la riduzione al minimo dei rifiuti, la separazione dei diversi materiali e il riciclaggio.

La fusione nucleare

I reattori a fusione naturali: le stelle

La fusione è il processo che fornisce energia all'universo: grazie a esso, la natura esiste nelle forme che conosciamo. In figura 1 è rappresentata una zona del cosmo con una notevole densità di polveri interstellari, costituite essenzialmente da idrogeno, che possono condensare a causa della mutua attrazione gravitazionale.



Fig. 1 Polveri intergalattiche che condensando danno origine alle stelle (Foto telescopio spaziale NASA/Hubble)

Le moderne teorie cosmologiche affermano che l'universo ha avuto origine circa 14 miliardi di anni fa da una gigantesca esplosione, ipotizzata per rendere conto del fatto che, in qualunque direzioni si osservi, le galassie appaiono allontanarsi con una velocità

proporzionale alla loro distanza da noi, secondo una legge formalizzata da Edwin Hubble nel 1929. L'unico modello in grado di spiegare una simile osservazione è quello che prevede che tutte le galassie si allontanino l'una dall'altra. Intuitivamente, si può visualizzare il processo disegnando dei puntini sulla superficie di un palloncino: inizialmente tutti i punti sono concentrati in un'area limitata; quando lo si gonfia la distanza tra due puntini qualunque aumenta.

Ma se tutto si espande da dove si è originato tutto? Se si riavvolgesse all'indietro il film dell'evoluzione dell'universo si vedrebbe tutta la materia concentrarsi in un punto iniziale a un certo istante che si può definire come lo zero del tempo e dello spazio. Al "tempo zero", dunque, è possibile immaginare un universo completamente vuoto, con l'unica eccezione di un punto in cui vi era una concentrazione di energia incredibilmente elevata. Dalla fisica moderna, tuttavia, si sa che il vuoto non è effettivamente tale, ma possiede una struttura complessa e affascinante. L'energia iniziale ha poi separato in modo violento le particelle dalle rispettive antiparticelle del "vuoto". All'inizio le particelle che si crearono erano quelle "elementari" non costituite cioè da altre particelle più piccole. Tra queste erano compresi elettroni, neutrini, quark, gluoni e le loro antiparticelle, cioè tutto lo "zoo" conosciuto delle particelle elementari. Nel corso dell'espansione originaria, questo gas caotico ad altissima temperatura, denominato plasma, si raffreddò e le particelle elementari, i quark e gluoni (i costituenti elementari dei nucleoni), formarono protoni che a loro volta si legarono agli elettroni formando l'idrogeno.

La prima domanda che viene spontanea è che cosa abbia potuto provocare la "perturbazione" iniziale. Una risposta, seppur parziale, potrà essere formulata quando sarà nota la densità media attuale della materia nell'universo. Da tale conoscenza potremo capire se l'espansione durerà per sempre o se a causa dell'attrazione gravitazionale (che dipende dalla densità di materia dell'universo) rallenterà fino a fermarsi e successivamente contrarsi. Contraendosi, l'universo raggiungerà delle densità talmente elevate da innescare processi tra le particelle e un nuovo Big Bang.

In questo scenario non c'è quindi un inizio e una fine ma una specie di moto armonico infinito. Questo scenario potrebbe però essere in contrasto con delle leggi della fisica confermate da tante

osservazioni. Una di queste leggi, il principio di aumento dell'entropia, afferma che in ogni processo naturale il disordine complessivo dell'universo aumenta. Ciò è in palese contrasto con il ritorno all'ordine iniziale.

Il collasso gravitazionale della materia verso un punto centrale viene utilizzato anche per spiegare l'origine delle stelle. In alcune zone dell'universo, infatti, può verificarsi una situazione come quella illustrata in figura 1, in cui si concentra una quantità notevole di polveri interstellari e di idrogeno in forma di plasma. L'attrazione gravitazionale, in opportuni condizioni, può dare origine a zone sempre più dense che attraggono altra materia, formando il nucleo originario di una stella. Oltre un certo limite di densità, infatti, i costituenti del plasma sono così vicini e la temperatura così elevata da innescare la fusione nucleare, con la creazione di nuclei di elio (Fig. 2).

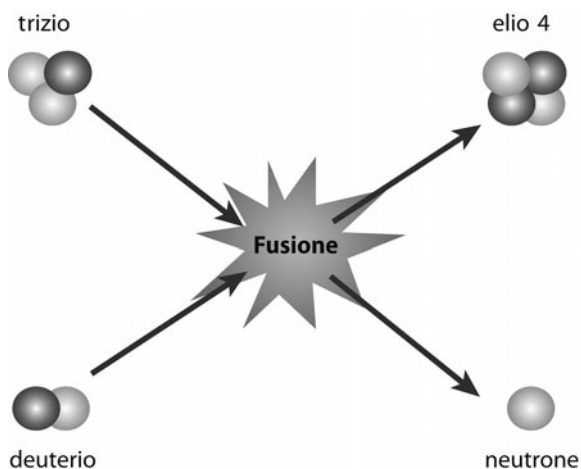


Fig. 2 Processo di fusione tra un nucleo di deuterio (protoni+neutrone) e uno di trizio (protoni+2 neutroni) con produzione di elio (2 protoni+2 neutroni) e di un neutrone libero. Nella reazione viene rilasciata una quantità di energia (circa 17 MeV) sotto forma di energia cinetica dei prodotti. La maggior parte dell'energia viene trasferita al neutrone

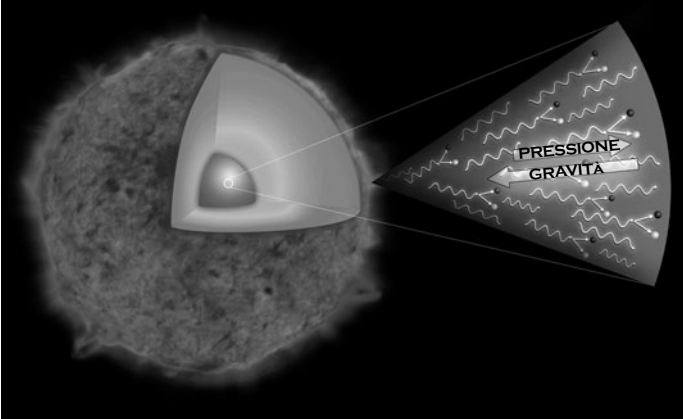


Fig.3 Schema delle forze opposte che agiscono all'interno di una stella: al collasso gravitazionale si oppone la pressione verso l'esterno prodotta dalle reazioni nucleari di fusione (Illustrazione NASA)

In figura 2 è descritto schematicamente il processo di fusione tra due particelle (deuterio e trizio in questo caso, ma in generale anche altre).

I nuclei delle stelle sono quindi reattori nucleari a fusione naturale. Questi possiedono un'energia cinetica molto alta, che li porta ad allontanarsi verso l'esterno, in verso contrario alla forza gravitazionale che cerca di comprimere la stella. Si determina così uno stato di equilibrio tra la pressione verso l'esterno, dovuta alle fusioni nucleari, che tende a far espandere la stella e la forza gravitazionale che tende a farla collassare su se stessa (Fig. 3).

Nella fase iniziale, all'interno della stella la fusione avviene tra isotopi dell'idrogeno, che danno origine a elio. Questa fase continua fino all'esaurimento di tutto l'idrogeno disponibile, per un arco di tempo che dipende da molti parametri fisici, tra cui la massa, la temperatura e le dimensioni della stella. Quando in seguito il processo si conclude, la stella va incontro a una contrazione determinando condizioni di densità così elevate da innescare la fusione tra atomi più pesanti, per esempio tra più nuclei di elio. In questo modo si formano elementi sempre più complessi, via via che la stella brucia il "carburante" fino a trasformare quasi tutto in ferro o in nuclei ancora più pesanti. Raggiunto questo stadio, la fusione non può più pro-

cedere spontaneamente e il processo si arresta. La successiva evoluzione della stella prevede l'esplosione di una supernova oppure la formazione di un buco nero, a seconda del tipo di stella e della sua evoluzione dinamica.

Un buco nero è un oggetto di massa paragonabile al Sole costituito per la maggior parte da elementi pesanti come il ferro concentrati in dimensioni molto limitate, dell'ordine di alcuni chilometri. Le sue zone più interne sono in forma di un plasma, e non più di nuclei, elettroni e altro, bensì dei loro costituenti elementari, cioè di quark e gluoni. La forza gravitazionale che esso genera è talmente elevata da attrarre non solo gli oggetti che si trovano vicini, ma anche la radiazione luminosa proveniente da altre galassie: proprio a questa capacità di "inghiottire" la luce si deve il nome di buco nero.

Questo, a grandi linee, è ciò che avviene nel cosmo da alcuni miliardi di anni. Ma com'è possibile copiare la natura per realizzare così la fusione in modo controllato e sfruttarne l'enorme energia liberata? La prima difficoltà da superare è quella di far avvicinare sufficientemente i nuclei reagenti, mettendoli in condizione di interagire a una distanza così breve che la forza repulsiva coulombiana tra i nuclei, carichi positivamente, venga superata da quella nucleare attrattiva. Nei paragrafi successivi discuteremo alcuni dei metodi proposti e studiati per ottenere questo scopo.

Fusione catalizzata da muoni

Per ottenere la fusione occorre un metodo che forzi i nuclei reagenti a superare la barriera coulombiana e raggiungere distanze relative molto piccole, dell'ordine cioè di alcuni fermi (10^{-15} metri) alle quali le forze nucleari sono predominanti. All'interno delle stelle, ciò è reso possibile dal moto termico dei nuclei e dall'intensa attrazione gravitazionale, che fanno sì che l'energia cinetica sia superiore all'energia potenziale dovuta alla repulsione tra le cariche possedute dagli stessi nuclei. A energie inferiori la fusione può ancora avvenire ma con probabilità più basse, in virtù di un fenomeno tipico della fisica quantistica denominato penetrazione della barriera o effetto tunnel. Si tratta di uno degli aspetti più peculiari della duplice natura ondulatoria e corpuscolare della materia e della radiazione: le particelle elementari, i nuclei e gli elettroni sono corpuscoli dotati di massa ma

a volte si comportano come onde elettromagnetiche. Allo stesso modo, la luce a volte si comporta come una particella. Così come la luce che si può propagare oltre un ostacolo ma con intensità minore, una particella può attraversare una barriera o un potenziale repulsivo generato da una particella dello stesso segno, anche se l'energia relativa dei reagenti è inferiore all'energia di repulsione dell'ostacolo. Quanto più è bassa l'energia relativa rispetto alla barriera repulsiva, tanto minore sarà la probabilità di fusione, e a energie relative nulle la probabilità di fusione diventa nulla.

Nel caso di due nuclei di idrogeno, la barriera coulombiana è molto elevata, dell'ordine del MeV (milioni di elettronvolt). Per questo motivo la probabilità della loro fusione a temperatura ambiente, che corrisponde a energie un milione di volte inferiore, è praticamente nulla.

A complicare la faccenda vi è il fatto che due nuclei di idrogeno, ovvero due protoni, non potrebbero fondersi neppure se venissero portati a energie relative superiori alla barriera: tale sistema di due protoni legati, cioè senza neutroni, non esiste in natura. In termini energetici, ciò significa che dal processo di fusione si ottiene energia solo se è presente almeno un neutrone in uno dei due atomi reagenti. Esperimenti di fisica nucleare dimostrano che il sistema con maggiore probabilità di fusione ed elevata produzione di energia è costituita da deuterio più trizio (che indicheremo d'ora in poi con D+T). Questo, che viene chiamato combustibile della prima generazione, è in effetti la materia prima più conveniente.

Anche nel caso del sistema D+T, ovviamente, occorre superare una barriera coulombiana per ottenere la fusione. Ma com'è possibile far avvicinare un atomo di deuterio e uno di trizio? Innanzitutto, la probabilità di averne quantità notevoli in un certo volume è praticamente nulla, dal momento che il deuterio è presente in quantità minime rispetto all'idrogeno, mentre il trizio è radioattivo, e quindi decade in tempi brevi. Da considerare poi che normalmente gli atomi sono elettricamente neutri, in quanto circondati da un numero di elettroni pari a quello dei protoni presenti nel nucleo. In un gas, in un liquido o in un solido, gli atomi si trovano a distanze considerevoli gli uni dagli altri, e la carica elettrica di ciascun nucleo è efficacemente "nascosta", o schermata, dagli elettroni che lo circondano. Il legame tra gli atomi che dà origine alle molecole è dovuto a fluttuazioni nel moto di questi elettroni, che a volte possono anche essere condivisi tra due o più atomi e che perciò pos-

sono mantenersi a una mutua distanza relativamente elevata. Per questo motivo, poiché le distanze tra elettroni e nuclei sono dell'ordine dell'ångstrom (10^{-10} metri) le energie di legami tra gli atomi sono dell'ordine dell'elettronvolt. Ora, se si immagina una collisione tra due atomi neutri di idrogeno, essi non si "vedranno", cioè non risentiranno della mutua interazione coulombiana, finché non si troveranno a distanze dell'ordine dell'ångstrom, quando le orbite elettroniche dei due atomi cominciano a intersecarsi: in queste condizioni i rispettivi nuclei sono a distanze minori dei raggi elettronici e le cariche elettriche repulsive non sono più schermate. A questo punto è necessaria un'energia tale da poter superare la barriera energetica.

In condizioni artificiali, è possibile "manomettere" gli atomi per ottenere condizioni più vantaggiose. In natura, infatti, esistono particelle elementari con proprietà simili a quelle degli elettroni: i muoni sono dotati della stessa carica elettrica ma di massa circa 200 volte maggiore. Poiché le due particelle sono simili, è possibile pensare di sostituire l'elettrone di un atomo con un muone dando origine così a un atomo muonico che, a causa della maggiore massa della particella "orbitante", avrà un raggio molto più piccolo dell'atomo normale. Pensando a un modello planetario, sarebbe come sostituire la Luna con un satellite di massa maggiore: in opportune condizioni, esso orbiterebbe a una distanza molto minore rispetto all'attuale. Ora, un altro atomo di idrogeno accelerato verso l'atomo muonico non subirebbe alcuna repulsione prima di aver superato la "nube muonica" che lo circonda. In tali condizioni la distanza relativa tra i due nuclei è così piccola che essi possono fondersi. Dal punto di vista energetico, se nel caso normale la barriera di potenziale da superare è dell'ordine del MeV, con i muoni che schermano la carica coulombiana tale barriera si riduce all'ordine degli eV e la fusione può avvenire anche a temperatura ambiente. Da sottolineare, a scanso di equivoci, che il processo di fusione indotta da muoni non ha niente a che vedere con la cosiddetta "fusione fredda" per la quale non esiste alcun dato sperimentale convincente e soprattutto riproducibile.

Nel processo di fusione catalizzata, un muone prodotto da un acceleratore viene catturato da un composto di D+T allo stato gassoso, liquido o solido a bassissime temperature (questo materiale deve essere molto puro poiché la presenza di ioni più pesanti, quin-

di con una maggiore carica elettrica porterebbe alla cattura del muone che non sarebbe più utilizzabile per la fusione). Una volta sostituito l'elettrone del deuterio o del trizio, si forma una molecola molto legata di D+T, i cui nuclei si trovano molto vicini, rendendo possibile la fusione in tempi brevissimi con formazione di un neutrone e una particella di elio. L'energia cinetica di queste particelle è molto elevata e può essere utilizzata per produrre vapore e muovere una turbina, anche se per calcolare il guadagno energetico netto occorre sottrarre da questa quantità l'energia spesa per il funzionamento dell'acceleratore per la produzione di muoni. Dopo la fusione, l'elio si muove ad alta velocità rispetto al muone: la probabilità di cattura è bassa e il muone può andare a sostituire un elettrone in un altro ione di deuterio o di trizio e continuare il ciclo. Se però il muone viene catturato dall'elio il processo si interrompe e non viene prodotta altra energia tramite il processo di fusione.

Ma c'è un'altra possibile causa di interruzione del processo: il decadimento del muone dopo circa due microsecondi (milionesimi di secondo). I dati sperimentali indicano che, in media, un singolo muone riesce a catalizzare circa 100 fusioni con una produzione di energia che è quasi pari a quella necessaria per alimentare l'acceleratore e produrre lo stesso muone. Attualmente, la ricerca è focalizzata sull'aumento del numero di fusioni, ma il problema maggiore rimane la cattura di muoni da parte dell'elio prodotto. Un'alternativa è quella di trovare metodi più efficienti ed energeticamente meno costosi per produrre i muoni: superato questo ostacolo sarebbe possibile realizzare una centrale a fusione catalizzata da muoni e in questa direzione sono diretti molti progetti di ricerca con ingenti investimenti in varie parti del mondo, specialmente in Giappone [41].

Una proposta originale prevede l'utilizzazione dei neutroni prodotti nella fusione, circa 100 per ogni singolo muone, nelle centrali nucleari a fissione al fine di produrre uranio 233 e torio 233. In questo caso l'energia per produrre i muoni è, come abbiamo visto, quasi interamente fornita dalle fusioni, mentre i neutroni potrebbero fare funzionare una centrale nucleare a fissione in condizioni sotto-critiche, aumentando anche l'efficienza di tali impianti, come discusso in precedenza.

Il tokamak: da JET a ITER

In figura 4 è mostrato l'interno del tokamak europeo denominato JET (acronimo di *Joint european torus*) situato presso il Culham Science Centre, nell'Oxfordshire, Regno Unito. Operativo dal 1983, è attualmente il reattore a confinamento magnetico su schema tokamak più grande al mondo [18].

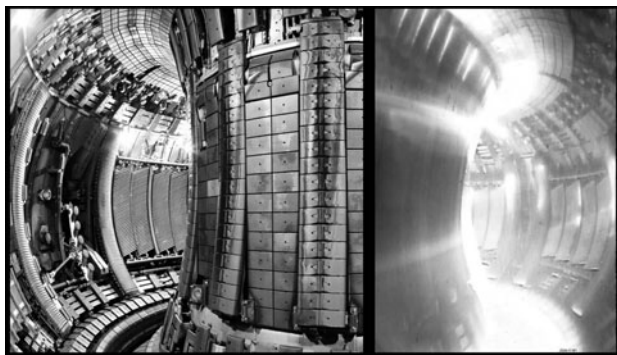


Fig. 4 Vista interna del tokamak Jet con sovrapposta una foto a raggi infrarossi del plasma (Foto EFDA-JET)

Nel 1997 JET ha permesso di ottenere per la prima volta un plasma confinato per un tempo sufficiente da compensare quasi interamente l'energia necessaria per il suo funzionamento. Lo schema di questo tipo di reattore è relativamente semplice ma la sua realizzazione presenta difficoltà tecniche notevoli.

In primo luogo, nella camera all'interno del reattore occorre creare un vuoto molto spinto. Per il funzionamento corretto della macchina, infatti, le impurità, quali molecole di ossigeno o carbonio, devono essere completamente eliminate per ottenere un plasma con le ottimali caratteristiche di temperatura, densità e durata. Un gas di D+T opportunamente preparato viene immesso nella camera e riscaldato in modo tale da essere completamente ionizzato: gli ioni e gli elettroni ad alta temperatura in forma di plasma sono completamente liberi di muoversi. Le cariche elettriche libere possono così interagire con i campi magnetici creati all'interno della camera, che raggiungono intensità elevatissime, dell'ordine di 4 tesla. Questi campi magnetici confinano il plasma all'interno della "ciam-

bella," al fine di evitare collisioni delle particelle con le pareti, effetti indesiderati che portano a un rapido raffreddamento del plasma e infine al suo spegnimento. In definitiva per far funzionare il reattore occorre arrivare a un compromesso tra due esigenze opposte: per sostenere la reazione occorre che la densità e la temperatura del plasma siano sufficientemente elevate, ma se i loro valori aumentano troppo il campo magnetico non è in grado di confinarlo e il processo si interrompe.

Per avere un'idea del funzionamento consideriamo il plasma come un gas ideale. In questo caso sappiamo che la pressione esercitata dal plasma è data dal prodotto della densità per la temperatura. Questa pressione, se si vuole confinare il plasma, deve essere bilanciata dai campi magnetici: sono proprio questi a definire il valore massimo raggiungibile dalla pressione. Il fattore critico, come si può ben capire, è l'ottimizzazione della densità del plasma.

Una soluzione alternativa è quella di produrre campi confinanti più intensi, in un reattore in grado di contenere volumi più grandi e con valori di temperatura e densità più alti di quelli tipici di JET e per tempi di confinamento più lunghi. È questo il progetto ITER, 10 volte più grande di JET, che ha l'obiettivo di ottenere un'energia dal plasma 10 volte superiore all'energia di funzionamento.

Ma prima di riuscire a raggiungere l'obiettivo desiderato, occorre studiare e risolvere alcuni problemi tecnologici importanti. In particolare, bisognerebbe:

- sviluppare nuovi materiali a tecnologia superconduttiva per produrre campi magnetici ancora più intensi ma che consumano poca energia;
- trovare nuovi metodi per portare la temperatura del plasma rapidamente al valore desiderato: ciò può essere ottenuto mediante particolari radiofrequenze che inducono delle oscillazioni nel plasma e collisioni tra le particelle costituenti che portano a un incremento della temperatura;
- ottenere un fascio di ioni neutri esterni che dissipi la sua energia nel plasma aumentandone la temperatura;
- smaltire la radioattività delle pareti del materiale dovuta all'enorme flusso di neutroni;
- considerare la possibilità di utilizzare, mediante opportuni materiali, i neutroni per la produzione di trizio che può essere quindi bruciato nel reattore minimizzando i costi;

– controllare il comportamento del plasma a temperature così elevate, mai esplorate prima sulla Terra, evitando che le turbolenze distruggano il plasma prima che sia possibile ricavare l'energia necessaria a superare quella spesa.

Tutti questi sono problemi formidabili che porranno delle enormi difficoltà agli scienziati e ai tecnici di tutto il mondo che lavorano oramai da mezzo secolo su questo progetto. Se verranno risolti avremo energia illimitata a prezzi che diventeranno competitivi con il raffinarsi delle tecnologie. Il fallimento non è contemplato: è prevedibile che da questa esperienza sarà possibile acquisire molte nuove conoscenze che ci aiuteranno in futuro ad andare oltre, non solo in questo campo ma anche in tante altre discipline che beneficeranno delle nuove tecnologie.

Fusione inerziale indotta da laser: la NIF

Uno schema diametralmente opposto ai due discussi sopra è quello della fusione inerziale. In questo caso l'obiettivo è di portare il materiale combustibile in condizioni di alta densità e a una temperatura ottimale per innescare il processo di fusioni a catena. Come già ricordato, l'incremento della densità e della temperatura porta a un aumento della pressione, che deve quindi essere opportunamente compensata da qualche fattore esterno. È importante tuttavia sottolineare come il numero di fusioni in un plasma non dipenda semplicemente dalla sua temperatura: occorre in primo luogo avere due elementi che reagiscono. Detto in altro modo, in un dato volume il numero di fusioni dipende dal numero di particelle del primo reagente moltiplicato per il numero di particelle del secondo reagente. In termini più fisici, il numero di fusioni dipende dal quadrato della densità dei reagenti (o dal prodotto delle densità se i reagenti sono diversi, per esempio D+T). Ciò significa che se la densità è molto bassa, come nel tokamak, occorre mantenere il plasma "acceso" per un tempo sufficientemente lungo per ottenere un notevole numero di fusioni. All'opposto, se si comprime il plasma ad altissima densità è possibile ottenere un numero di fusioni sufficienti affinché il reattore si autoalimenti, anche se il plasma compresso rimane "acceso" per un tempo brevissimo. Per ottenere questo scopo, si è pensato di utilizzare diversi laser di elevatissima energia che



Fig. 5 Un bersaglio dei laser della NIF: un involucro di 2 millimetri di diametro contiene idrogeno allo stato criogenico (Foto: LLNL)

comprimono radialmente una gocciolina di D+T portata a bassissime temperature (Fig. 5).

Dopo le esperienze interessanti fatte in vari laboratori del mondo, per esempio presso l'Università di Rochester, negli Stati Uniti, si è arrivati alla costruzione della National Ignition Facility (NIF) a Livermore, in California, terminata nel 2009 [19]. Si tratta di un impianto grande quanto due campi di calcio, contenente 192 laser in grado di sviluppare una energia complessiva di 1,8 milioni di joule in alcuni nanosecondi. Il sistema fornisce così circa tre miliardi di watt per centimetro quadrato, un valore eccezionale, tenuto conto che il Sole fornisce alla superficie della Terra un decimo di watt per centimetro quadrato!

Per il successo dell'esperimento è importante che i raggi laser comprimano in modo uniforme la gocciolina, in modo da ottenere una "piccolastella" che esploderà a causa dell'enorme numero di fusioni. Il processo durerà alcuni nanosecondi, equivalente cioè al tempo di funzionamento dei laser. I prodotti energetici della fusione permetteranno di riscaldare un liquido e di produrre in tal modo il vapore che servirà ad alimentare una turbina. Finito questo processo, una nuova gocciolina prenderà il posto della precedente e verrà illuminata dai laser. In laboratorio si dovrebbe così assistere all'esplosione di tante piccole stelle, circa otto al giorno, in modo da ottenere ener-

gia dalla fusione in modo continuo come richiesto per una centrale.

Per di avere 1.000 “stelle” al giorno, occorrerebbe circa un chilogrammo di materiale con una produzione di energia equivalente a quella di 11.000 tonnellate di carbone, consumate giornalmente in una grande centrale che funziona bruciando questa materia prima: per il trasporto di tale materiale è necessario un treno lungo due chilometri. Le centrali a carbone, come sappiamo, producono anche un’enorme quantità di CO_2 , e quindi sono tra le maggiori responsabili dell’inquinamento ambientale.

Riuscire a realizzare laser ad alta ripetizione in grado di garantire una simile frequenza è una delle sfide tecnologiche per questo tipo di tecnologia.

Un altro progetto estremamente interessante denominato HiPER (*High power laser energy research facility*) è stato proposto nel 2007 a livello europeo con costi simili al progetto NIF. Il suo schema di funzionamento è simile a quello di un motore a combustione interna di una comune automobile: inizialmente, il combustibile è direttamente compresso da circa 200 impulsi laser ad alta energia e della durata dell’ordine di un nanosecondo (un miliardesimo di secondo). Alla fine della compressione, un altro raggio laser di alta energia ma durata dell’ordine del femtosecondo – cioè un milione di volte più breve – viene opportunamente focalizzato sul plasma attraverso un cono costruito con materiale metallico, per esempio oro, per evitare interazioni del laser con il plasma formato precedentemente. Quest’ultimo laser ha la stessa funzione di una candela di accensione nel cilindro di un motore a scoppio, poiché fornisce una scintilla che dà origine alla combustione, che avviene in questo caso a livello nucleare, con una produzione enorme di energia per ciascun processo.

Il progetto non ha ancora ottenuto i finanziamenti necessari, ma ci si augura che le difficoltà vengano superate per evitare che l’Europa rimanga indietro rispetto agli Stati Uniti in questo campo molto importante per il futuro energetico dell’umanità.

La Luna e le miniere di elio 3

Nei tre approcci sopra discussi, il combustibile utilizzato è una miscela di deuterio e trizio. Questa miscela, detta di prima generazione, è

quella con la più alta probabilità di fusione ma è afflitta da alcuni inconvenienti degni di nota. Il primo è il fatto che il trizio non esiste in natura perché è radioattivo. Ne consegue che deve essere prodotto artificialmente e presenta una certa pericolosità per l'uomo e l'ambiente anche se le quantità necessarie al funzionamento di una centrale sono veramente modeste. Il secondo problema, più serio, è legato ai neutroni prodotti nelle reazioni, che possiedono un'energia relativamente alta e non vengono efficacemente rallentati dal liquido di raffreddamento della centrale. Inoltre, essi sono pericolosi perché interagiscono con il materiale della camera di combustione rendendolo radioattivo e perché indeboliscono le strutture, che quindi devono essere periodicamente revisionate (questo problema riguarda in particolare il tokamak più che gli altri metodi discussi).

Un modo per aggirare questi ostacoli è sostituire il trizio con elio 3. Sulla Terra questo elemento è presente in quantità modeste, e viene principalmente impiegato per scopi militari e in parte per la ricerca. Su pianeti e satelliti naturali senza atmosfera, come sulla Luna, sono state trovate notevoli quantità di questo isotopo: le stime parlano di 0,01 parti per milione nelle rocce lunari, dove si è depositato nel corso di milioni di anni.

Ciò ha dato il via a una corsa alla sua colonizzazione spaziale, anche se non ufficialmente dichiarata, e attualmente solo sulla carta con lo scopo di sfruttare i giacimenti di elio 3. Un simile entusiasmo per un'impresa tanto rischiosa è giustificato dal ritorno economico previsto: si stima che il valore commerciale di un carico di elio 3 di uno *shuttle* sia intorno a tre miliardi di dollari. Naturalmente questo valore ipotetico diventerà reale solo se gli studi sulla fusione avranno a breve un esito positivo nei proposti esperimenti NIF e ITER. Nei progetti dichiarati dalle varie agenzie spaziali, si parla delle prime basi permanenti lunari attorno al 2020 [42, 43].

Ma perché tanto interesse? Il fatto è che utilizzando l'elio al posto del trizio si ottiene una maggiore efficienza per la creazione di calore finalizzata al funzionamento delle turbine. Infatti i prodotti della reazione sono due elementi carichi, elio 4 e protoni, la cui energia cinetica può facilmente essere dissipata in calore. Con questa miscela la radioattività è praticamente nulla, poiché le fusioni che possono avvenire tra due nuclei di deuterio (che producono un neutrone) sono molto basse rispetto a quelle tra un nucleo di elio e un

nucleo di deuterio. Di conseguenza, in linea di principio l'efficienza di una centrale a elio 3 sarebbe enorme e il suo impatto ambientale molto limitato.

La sostituzione del trizio con l'elio presenta però alcuni problemi, dovuti alla minore probabilità di fusione. Per questa miscela la carica coulombiana dei reagenti è infatti più alta e per questo motivo occorre più lavoro per portare i nuclei a una distanza tale da innescare la fusione. I meccanismi discussi sopra possono essere applicati anche a questa miscela ma potrebbero non dare i risultati sperati. In particolare, nella fusione indotta da muoni, questi ultimi possono essere facilmente catturati da nuclei di elio che hanno carica maggiore di quella del deutone (il nucleo di deuterio costituito da un protone e un neutrone). Ma il muone in questo caso non è in grado di schermare completamente la carica elettrica del nucleo (che è +2): la repulsione coulombiana tra i reagenti, anche se ridotta, non è sufficientemente bassa. A questo punto bisogna pensare o ad aumentare la densità dei muoni in modo tale che l'elio possa catturarne due e quindi venire completamente schermato (un processo poco probabile), oppure ad aumentare la temperatura del combustibile in modo da poter superare il residuo potenziale coulombiano.

Nel caso del tokamak, le interazioni tra i campi magnetici e il plasma sono ora differenti a causa delle diverse cariche presenti e questo potrebbe portare a una modifica sostanziale del progetto. Similmente, per la fusione indotta da laser, la compressione potrebbe non essere sufficiente a innescare le reazioni nucleari a catena e per questo motivo potrebbero essere necessari laser di maggior potenza e/o numero. Tali problemi sono in generale considerati meno importanti di quelli affrontati finora e tra scienziati, ingegneri e tecnici impegnati nei progetti di fusione si registra un generale ottimismo sulla possibilità che, una volta raggiunta la condizione ottimale con la miscela D+T, la sostituzione con la miscela di seconda generazione presenterà problemi di minore entità. Quindi è solo una questione di tempo, ricerca e investimenti.

Un ultimo accenno va dedicato a un combustibile pulito e abbondante anche sulla Terra, costituito dalla miscela p+B-11 (protoni e boro 11). A causa della carica coulombiana del boro, pari a +5, la repulsione è molto più forte dei casi precedenti e la fusione con tale nucleo è meno probabile: si parla in questo caso di combusti-

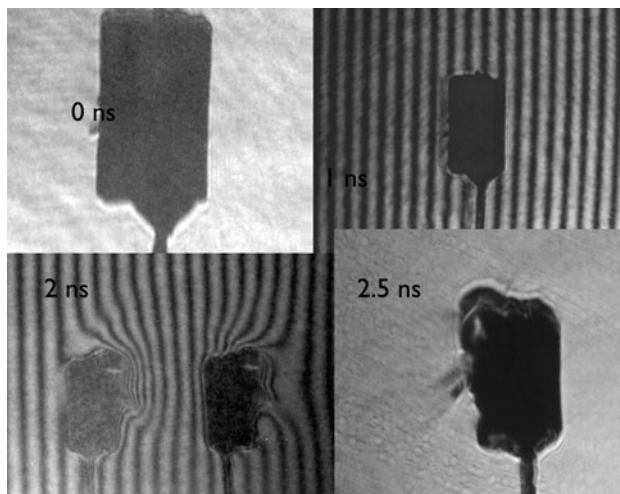


Fig.6 Plasma ottenuto dall'interazione del laser ABC dell'ENEA di Frascati con un bersaglio composto da idrogeno, boro e carbonio. Le foto sono realizzate con particolari tecniche a diversi tempi come indicato (in nanosecondi). Al tempo zero, il laser colpisce il bersaglio e si forma un plasma che raggiunge una temperatura di circa 10 KeV e si espande. Durante questa espansione, nel plasma caldo si verificano reazioni di fusione e le particelle di elio prodotte vengono rivelate con opportuni sistemi (Foto di A.Caruso, C. Strangio e collaboratori ENEA-INFN dell'esperimento Laplafus) [44]

bile di terza generazione. D'altra parte i prodotti di fusione, molto energetici, sono tre particelle di elio che possono essere facilmente rallentate per produrre calore. Proprio per la bassa probabilità di fusione, la ricerca in questo campo è ancora all'inizio: in figura 6 è mostrato il risultato di un esperimento condotta nei laboratori ENEA di Frascati.

Conclusioni

La domanda da cui siamo partiti è: *Quale energia per il futuro?* Per rispondere ci siamo avventurati in una rapida analisi, forse incompleta ma sicuramente animata da spirito di obiettività, dei vari metodi proposti per produrre energia soprattutto pensando al "dopo petrolio". Per fissare subito le idee dobbiamo ricordare che la maggior parte delle discussioni dei capitoli precedenti riguardava la produzione di energia elettrica. Questa parte di fabbisogno della società è circa il 20 per cento del totale. Il rimanente 80 per cento riguarda il settore dei trasporti, l'industria, l'agricoltura e quant'altro, e si basa essenzialmente sul petrolio. Ciò significa che le soluzioni fin qui trattate dovranno trovare applicazione anche in questi settori.

La buona notizia è che le riserve di petrolio e carbone sono ancora tali da permettere la crescita graduale delle fonti alternative, naturalmente tenendo d'occhio l'inquinamento. In linea di principio quasi tutte le soluzioni proposte possono, almeno sulla carta, soddisfare la sete di energia attuale e anche di più. In pratica però alcune soluzioni o sono troppo costose o richiedono un impegno di risorse troppo grande e spazi enormi. Bisogna quindi decidere in che direzione muoversi evitando facili scorciatoie verso questa o quella risorsa, che possono nascondere interessi economici di parte.

Vale allora la pena di ripassare a volo di uccello alcuni metodi promettenti, cominciando con il solare.

L'energia irradiata dal Sole è sufficiente a soddisfare i bisogni dell'umanità ed è virtualmente infinita. Il problema è l'efficienza dei metodi attuali nel catturare e immagazzinare tale energia. Per

la centrale di Solana in Arizona occorrono circa 7 Km² per produrre 280 MW per un costo di circa un miliardo di dollari. La potenza elettrica prodotta da fonti rinnovabili in Italia è di circa 22 GW, quella totale di circa 138 GW. Una semplice proporzione mostra che per fornire questa stessa potenza elettrica con pannelli fotovoltaici occorrerebbe un'area di circa 3.500 km², corrispondente a un quadrato di circa 60 chilometri di lato, con un costo complessivo pari a circa 500 miliardi di dollari.

Se si volessero estendere queste stime a trasporti, agricoltura e altro occorrerebbe moltiplicarle per un fattore cinque. Si tratta indubbiamente di valori elevati, ma non impossibili da raggiungere, considerando anche che per una simile produzione di massa i prezzi dei componenti della centrale potrebbero abbassarsi enormemente, anche di un fattore 10. Per completezza, occorre notare tuttavia che la costruzione dei pannelli determina un seppur minimo inquinamento da CO₂. Inoltre, non è detto che la temperatura media della Terra si abbassi per effetto dell'assorbimento dell'energia proveniente dal Sole da parte delle centrali solari invece di essere riflessa nello spazio. Occorre considerare che in ultima istanza questa energia viene dissipata nelle varie attività umane e quindi trasformata in calore. È difficile stimare che tipo di conseguenze possa avere sul clima un tale assorbimento locale di energia. In ogni caso, data la minore emissione di CO₂, l'effetto serra dovrebbe diminuire e con esso il riscaldamento della Terra.

In Paesi densamente popolati e con un fabbisogno energetico molto elevato come il Giappone, è probabile che non esistano zone sufficientemente soleggiate dove poter installare una centrale di dimensioni maggiori di quella da noi stimata. Ma l'alta densità di popolazione implica anche una grande densità di abitazioni e quindi di edifici sui quali è possibile applicare pannelli di piccole dimensioni, trasformando così le case in piccole centrali elettriche che non necessitano di grossi investimenti.

Le stesse valutazioni valgono per l'eolico, che comunque può vantare costi ridotti a un terzo rispetto a quelli del solare. Anche in questo caso, però, occorre uno spazio notevole: chilometri di impianti eolici sull'Appennino o su altre catene montuose porterebbero notevoli danni al paesaggio. È stata anche formulata la proposta di sfruttare i pali della luce già installati integrando tur-

bine orizzontali invece che verticali. In questo caso se l'occhio si è già abituato a questo arredo urbano, difficilmente farebbe caso a pali leggermente modificati.

Nell'immediato la risorsa più interessante, che non presenta i problemi del solare e dell'eolico è probabilmente il geotermico, in particolare il sistema EGS. Gli impianti di questo tipo non necessitano di grandi spazi e possono essere installati dove c'è più bisogno di energia, specialmente in Paesi come l'Italia e il Giappone che si trovano in zone "calde" dal punto di vista geologico.

Anche da un punto di vista economico questa è senza dubbio una soluzione molto più vantaggiosa rispetto alle altre e probabilmente, con l'affinarsi delle tecnologie, già competitiva con il carbone e il petrolio.

Un investimento sull'EGS meriterebbe la priorità: il primo passo sarebbe la realizzazione di una centrale sperimentale, come si sta già facendo per esempio in Australia. Particolare attenzione va dedicata alla scelta del sito che dovrebbe essere a bassa densità di popolazione tenuto conto del possibile verificarsi dei terremoti locali. Questo rischio, in ogni caso, non è tale da impedire la realizzazione di una prima centrale sperimentale.

Passando al nucleare, per coprire i 138 GW stimati sopra occorrerebbero circa 140 centrali nucleari, che richiederebbero in linea teorica un investimento di circa 140 miliardi di euro, inferiore sia al solare sia all'eolico, ma non al geotermico. Il problema di questa scelta è, come illustrato nel secondo capitolo, la limitata efficienza delle centrali nucleari attuali. In particolare, se tutti i Paesi volessero utilizzare questo metodo avremmo risorse solo per alcune decine di anni. D'altra parte se si volesse ottimizzare il consumo sfruttando i processi di riciclaggio delle barre di combustibile il prezzo aumenterebbe notevolmente. Volendo insistere su questa strada, in ogni caso, il riciclaggio è l'unica opzione: si tratta infatti di una tecnologia che non inquina e non contribuisce al riscaldamento ambientale. Una via sicuramente valida è lo sfruttamento della tecnologia CANDU grazie alla quale i reattori utilizzano uranio naturale con alta efficienza e sicurezza. Le altre tecnologie, inoltre, possono servire da alibi a chi vuole usare il materiale fissile per realizzare ordigni nucleari.

Sulla carta la fusione nucleare è la soluzione definitiva alla sete energetica dell'uomo. Costruire anche 300 centrali nucleari a

fusione in Italia è possibile (soprattutto a tecnologia D+He-3) perché pulita, sicura e non inquinante. I prezzi potrebbero essere simili alle centrali nucleari a fissione una volta raffinata la tecnologia. In tal caso, i nostri metodi di trasporto dovrebbero essere modificati: il parco veicoli dovrebbe in sostanza essere costituito di sole auto elettriche o a idrogeno prodotto nelle centrali.

Infine, si apre la prospettiva di sfruttamento delle risorse di elio 3 della Luna. Per questo occorrerebbe che alcuni lavoratori si recassero sul nostro satellite per estrarre il combustibile necessario allo sfruttamento energetico. Questi potrebbero essere seguiti da turisti che andrebbero ad ammirare non più solamente le bellezze della nostra Terra, ma anche quella parte dell'universo alla quale noi apparteniamo.

Ulteriori letture

- 1) A. Bonasera, Y. El Masri, J.B. Natowitz: *Introduction to Modern Nuclear Science and its Applications* (Taylor & Francis/CRC Press publisher, 2010)
- 2) C. Ngo, J.B. Natowitz: *Our Energy Future* (Wiley, 2009)
- 3) U.S. Energy Information Administration, <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/RecentPetroleumConsumptionBarrelsperDay.xls>
- 4) U.S. Energy Information Administration, http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet_pri_wco_k_w.htm
- 5) Barack Obama Acceptance Speech: <http://www.nytimes.com/2008/08/28/us/politics/28text-obama.html>; <http://www.youtube.com/watch?v=tQGSP8mnHsg>
- 6) World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>
- 7) Obama dumps Yucca Mountain (World Nuclear News, 27 febbraio 2009), <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=24743>
- 8) World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>
- 9) J. Rather, Planning the Fate of a Nuclear Plant's Land, New York Times, 4/1/2009, <http://www.nytimes.com/2009/01/04/nyregion/long-island/04shorehamli.html>
- 10) CANDU Nuclear Power Technology, http://www.nuclearfaq.ca/cnf_sectionA.htm#candu_control
- 11) Gestore Servizi Elettrici: Statistiche sulle fonti rinnovabili in Italia (2008), <http://www.gse.it/attivita/statistiche/Documents/STATISTICHE2008GSE.pdf>.

- 12) Europe's Energy Portal, <http://www.energy.eu/#renewable>
- 13) D.Cyranoski: Beijing's windy bet, *Nature*, **457** 372 (2009)
- 14) Republic of Austria Federal competition authority: General investigation of the Austrian electricity industry (2004), <http://www.bwb.gv.at/NR/rdonlyres/482283D0-BC87-46E6-A985-559E03C23B83/19897/1stinterimreportengl.pdf>
- 15) Can Coal Be Clean? (Editorial) *Nature* **459**, 299-300 (2009), <http://www.nature.com/nature/journal/v459/n7245/full/459299b.html>
- 16) Österreichisches Ökologie-Institut: Science or fiction: Is there a future for nuclear?, http://www.ecology.at/ecology/files/pr577_1.pdf
- 17) <http://www.iter.org/default.aspx>
- 18) <http://www.jet.efda.org/>
- 19) <https://lasers.llnl.gov/>
- 20) HiPER Project Web Site, <http://www.hiper-laser.org/index.asp>
- 21) World Nuclear Association: Tokaimura Criticality Accident, <http://www.world-nuclear.org/info/inf37.html>
- 22) M. Wald, TR10: Traveling-Wave Reactor Technology Review - Special Report: 10 Emerging Technologies 2009, <http://www.technologyreview.com/energy/22114/page1>
- 23) Nuclear Decommissioning Authority: Dounreay - Future Plans, <http://www.nda.gov.uk/sites/dounreay/dounreayplans.cfm>
- 24) J.W. Tester et al: The Future of Geothermal Energy The Future of Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century (2006), http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf
- 25) The International Geothermal Association (IGA), <http://www.geothermal-energy.org/geo/geoenergy.php>
- 26) A. Manzella, A. Bianchi: Le prospettive della geotermia. ANALYSIS-ANPRI 4/2008, http://www.analysis-online.net/2008_4dic08.html
- 27) U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy: Geothermal Technologies Program, <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36317.pdf>
- 28) A. Maroni (Divisione Teleriscaldamento, Gruppo HERA): Il sistema energetico integrato Geotermia nella città di Ferrara (2008), <http://www.egec.org/target/milano08/EGEC%20WS%20milano%2011%20190508.pdf>

- 29) K.Pruess, Enhanced geothermal systems (EGS): comparing water and CO₂ as heat transmission fluids, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA, <http://www.osti.gov/geothermal/servlets/purl/922829-PGug7p/922829.pdf>
- 30) R.W. Righter: *Wind Energy in America: A History* (University of Oklahoma Press, 1996)
- 31) Magenn Air Rotor System (M.A.R.S.), <http://www.magenn.com/>
- 32) J. Knight: Urban wind power: Breezing into Town, *Nature*, **430** 12 (2004)
- 33) ScienzaIndustriaTecnologia: Eolic Lightstreet Distributed Energy Resource [Elder], http://www.scintec.it/ricerca/energia/rappor-to_elder_Eng.pdf
- 34) <http://www.aps.com/main/green/Solana/Technology.html>
- 35) C.Dennis: Solar Energy: Radiation Nation, *Nature*, **443** 23-24 (2006)
- 36) B. Collis e A. Bentley: Energy transformed: solar energy in a tank, CSIRO Solve, 8/2006, <http://www.solve.csiro.au/0806/article14.htm>
- 37) E. Callaway: To Catch a Wave, *Nature*, **450** 156 (2007)
- 38) B. Grant, Future Oil, *The Scientist*, febbraio 2009
- 39) E. J. Steen et al.: Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass, *Nature*, **463** 559 (2010)
- 40) <http://www.wwfalineditrapani.it/riserva.htm>
- 41) http://mssl-www.kek.jp/activity/activity5/index_en.html
- 42) http://www.nasa.gov/externalflash/CxEMM_SITE/index.html
- 43) R. X. Lenard Systems Analyst Desert Fox Engineering Space Commerce Study Update Enabling the President's Space Exploration Vision, <http://spaceinvestmentsummit.com/lcr1/presentations/PPT-Lenard.ppt>
- 44) LAPLAFUS collaboration: Proceedings of the Fourth International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei. World Scientific, Singapore, 2008, pp. 503–507

i blu - pagine di scienza

Passione per Trilli. Alcune idee dalla matematica

R. Lucchetti

Tigri e Teoremi. Scrivere teatro e scienza

M.R. Menzio

Vite matematiche. Protagonisti del '900 da Hilbert a Wiles

C. Bartocci, R. Betti, A. Guerraggio, R. Lucchetti (a cura di)

Tutti i numeri sono uguali a cinque

S. Sandrelli, D. Gouthier, R. Ghattas (a cura di)

Il cielo sopra Roma. I luoghi dell'astronomia

R. Buonanno

Buchi neri nel mio bagno di schiuma ovvero L'enigma di Einstein

C.V. Vishveshwara

Il senso e la narrazione

G.O. Longo

Il bizzarro mondo dei quanti

S. Arroyo

Il solito Albert e la piccola Dolly. La scienza dei bambini e dei ragazzi

D. Gouthier, F. Manzoli

Storie di cose semplici

V. Marchis

Novepernove. Segreti e strategie di gioco

D. Munari

Il ronzo delle api

J. Tautz

Perché Nobel?

M. Abate (a cura di)

Alla ricerca della via più breve

P. Gritzmann, R. Brandenburg

Gli anni della Luna. 1950-1972: l'epoca d'oro della corsa allo spazio

P. Magionami

Chiamalo x! ovvero Cosa fanno i matematici?

E. Cristiani

L'astro narrante. *La Luna nella scienza e nella letteratura italiana*

P. Greco

Il fascino oscuro dell'inflazione. *Alla scoperta della storia dell'Universo*

P. Fré

Sai cosa mangi? *La scienza nel cibo*

R.W. Hartel, A.K. Hartel

Water trips. *Itinerari acquatici ai tempi della crisi idrica*

L. Monaco

I lettori di ossa

C. Tuniz, R. Gillespie, C. Jones

Pianeti tra le note. *Appunti di un astronomo divulgatore*

A. Adamo

La fine dei cieli di cristallo. *L'Astronomia al bivio del '600*

R. Buonanno

Il gesuita che disegnò la Cina. *La vita e le opere di Martino Martini*

G.O. Longo

La materia dei sogni

R. Piazza

Et voilà i robot. *Etica ed estetica nell'era delle macchine*

N. Bonifati

Quale energia per il futuro? *Tutela ambientale e risorse*

A. Bonasera

Di prossima pubblicazione

Per una storia della geofisica italiana. *La nascita dell'Istituto Nazionale di Geofisica e la figura di Antonino Lo Surdo (1931-1949)*

F. Foresta Martin, G. Calcara

Odissea nello zeptospatio. *Un viaggio nella fisica dell'LHC*

G.F. Giudice