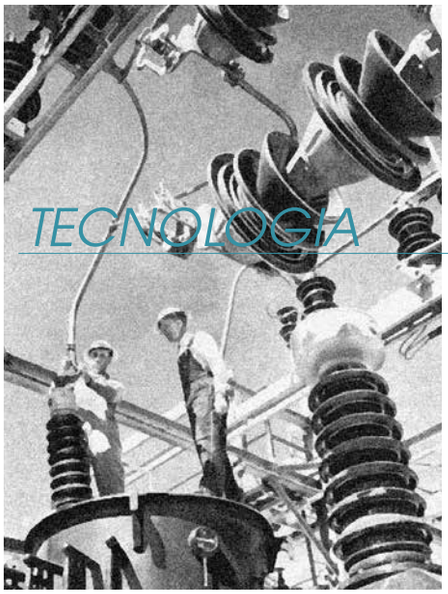


di Marco Ciotti*, Ettore Ruberti**, Jorge L. Manzano***

NUCLEARE DI NUOVA GENERAZIONE: I REATTORI A PIOMBO

The sustainability characteristics of an especial Generation IV nuclear reactor are discussed. This lead cooled fast reactor has intrinsic safety features, produces a negligible amount of long life heavy radioactive elements, needs little natural resources and has a high energetic efficiency; all these confer to it the highest sustainability scores. This reactor is the best candidate to reduce CO_2 emissions and to supply electricity in a programmable way, with negligible carbon and pollution emissions, employing natural resources available by millennia in many countries.

L'articolo analizza le caratteristiche di un particolare tipo di reattore nucleare di IV generazione, quello veloce raffreddato a piombo. Questo reattore, grazie alle sue caratteristiche di sicurezza intrinseca, alla generazione trascurabile di scorie ad alta radiotossicità e lunga vita, al limitato fabbisogno di risorse naturali e all'alta resa energetica, possiede caratteristiche tali da poter essere collocato tra le fonti di generazione elettrica maggiormente sostenibili. Risulta pertanto il candidato più idoneo per ridurre le emissioni inquinanti e clima-alteranti, assicurando al contempo la fornitura di elettricità programmabile con risorse naturali disponibili per millenni e reperibili in moltissimi paesi.

Negli ultimi decenni la sostenibilità delle azioni umane è diventata un argomento centrale, sia nelle tematiche affrontate dalla maggior parte dei politici, sia nelle preoccupazioni dell'opinione pubblica. Esiste una vasta letteratura sul concetto di sostenibilità; per completezza, bisogna aggiungere che vi sono anche degli approcci critici (fortemente minoritari in Europa) al quadro ideologico sottostante il concetto di sostenibilità (Taylor 2002) che considerano intrinseca la capacità dei sistemi produttivi di autoregolarsi.

Nonostante che il 27% della generazione elettrica europea e l'11% di quella mondiale siano di origine nucleare, negli ultimi decenni questa fonte di energia è stata messa in discussione, ben prima degli incidenti nei reattori di Chernobyl e Fukushima, innescando dei timori nell'opinione pubblica e la messa in dubbio della sua sostenibilità ambientale ed economica ([1]).

Lo scopo di questo articolo è fornire una versione divulgativa del più ampio lavoro presentato alla Conferenza internazionale ICONE-22 e pubblicato, dopo revisione, nei suoi atti (Ciotti et al. 2014a). Ciò al fine di dimostrare, in modo maggiormente argomentato, che la sostenibilità dell'energia nucleare sarà notevolmente migliorata grazie ai reattori di quarta generazione (noti con la sigla Gen. IV) a spettro neutronico veloce e, in particolare, quelli raffreddati a piombo e alimentati tramite un ciclo del combustibile adiabatico. Questi impianti, sia per le caratteristiche concettuali del loro progetto, sia per i materiali impiegati, presentano caratteristiche di sicurezza intrinseca tali da poter sostanzialmente escludere rilasci di radioattività all'esterno dell'edificio reattore; inoltre, il loro combustibile può anche provenire dalle scorie degli attuali reattori commerciali, senza produrne di nuove, assicurandone la completa sostenibilità del ciclo.

I reattori Gen. IV hanno caratteristiche migliorate, anche rispetto agli attuali reattori termici commerciali raffreddati ad acqua, di

* ENEA, Centro Ricerche Casaccia
marco.ciotti@enea.it
** ENEA, Centro Ricerche Santa Teresa
*** ENEA, Centro Ricerche Frascati

sostenibilità ambientale anche in relazione al rapporto tra energia utilizzata ed energia prodotta – noto come EROI, *Energy Return On Energy Invested* – e nella minore emissione di gas serra.

1. IL REATTORE ADIABATICO

Nei reattori veloci il contenuto energetico estraibile dalla stessa quantità di combustibile fresco rispetto ai reattori termici è di circa due ordini di grandezza superiore. Di conseguenza, a parità di energia elettrica prodotta, diminuiscono di tale fattore sia la quantità di minerale utilizzato, sia quella di scorie prodotte.

Inoltre, le speciali proprietà neutroniche del piombo consentono di progettare un nocciolo che mantiene nell'intero arco di vita le quantità di plutonio (Pu) e di attinidi minori (MA) ([2]) a valori costanti. Tale caratteristica consente di definire questo reattore come *adiabatico,* a causa del suo ciclo di combustibile praticamente chiuso. Solo i prodotti di fissione e le perdite causate dal riprocessamento devono essere inviati agli impianti di stoccaggio (Fig. 1). Ciò comporta un volume trascurabile di scorie prodotte e la conseguente drastica diminuzione sia del calore generato nel deposito, che della radiotossicità a lungo termine. L'unico combustibile da aggiungere durante la vita del reattore è l'uranio naturale, impoverito o recuperato.

Un progetto di reattore al piombo, l'*European Lead-cooled Fast Reactor* (ELFR) (Frogheri et al. 2013), è stato concepito nell'ambito del progetto LEADER (*Lead-cooled European Advanced DEmonstrator Reactor*) del settimo programma quadro EURATOM ([3]). Tale reattore è stato disegnato per funzionare adiabaticamente e rappresenta la filiera di riferimento, su scala industriale, tra i reattori raffreddati a piombo, per una possibile politica europea di produzione energetica che sia sostenibile nel lungo periodo. Per tale progetto, supponendo di raggiungere un grado di efficienza nel riprocessamento del combustibile del 99,9%, già ottenuta a livello di laboratorio, un irraggiamento di 100 GWd/t ([4]) e un'efficienza nella conversione del calore del 40%, il quantitativo di scorie transuraniche destinate allo stoccaggio è di 0,012 kg/TWh$_e$ per gli MA e di 0,227 kg/TWh$_e$ per il Pu (Artioli et al. 2010). Questo quantitativo di MA, da conferire in depositi geologici, è dovuto alle perdite che avvengono durante il riprocessamento, mentre il reattore adiabatico non produce nuovi MA. È doveroso paragonare questi valori con quelli di un reattore nucleare di terza generazione (Gen. III) in un ciclo aperto standard, pari a 3,0 e 26,1 kg/TWh$_e$ di MA e Pu rispettivamente.

In Ciotti et al. (2014b) si analizza in dettaglio uno scenario in cui si ipotizza una graduale introduzione di reattori veloci raffreddati a piombo (noti con la sigla inglese LFR, *Lead Fast Reactor*) in sostituzione di quelli termici nei paesi dell'area balcanica e in Italia, determinando gli effetti sull'entità di transuranici prodotti. Le simulazioni mostrano che, se il 25% di tutta la richiesta elettrica italiana del 2013 (317 TWh) fosse stato assicurato da LFR, solo 950 g di MA e 18 kg di Pu sarebbero stati conferiti ai siti di stoccaggio; cosicché, se si utilizzassero i contenitori previsti per il deposito geologico di Yucca Mountain (Stati Uniti), il cui volume è di circa 10 m^3, in ciascuno di essi si potrebbero stoccare le scorie generate durante cinque anni di produzione di energia elettrica nucleare. A questi andrebbero aggiunti i prodotti di fissione (106 kg/TWh$_e$), che non rappresentano particolari difficoltà di stoccaggio a causa della loro emivita molto più breve.

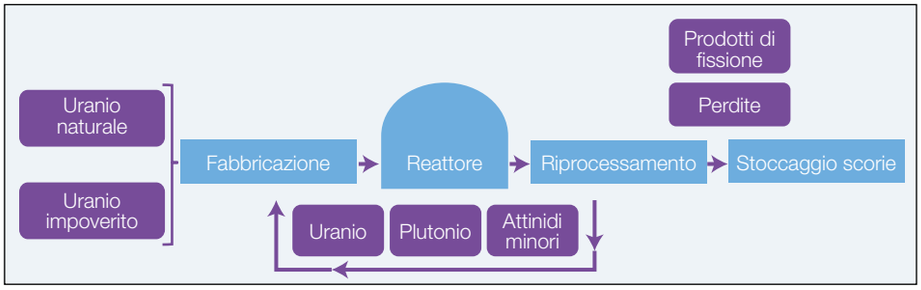
Per renderci conto degli ordini di grandezza in gioco, confrontiamo queste quantità con la CO_2 che dovrebbe essere immagazzinata per una produzione equivalente di energia elettrica con impianti alimentati mediante combustibili fossili.

È chiaro che le possibili conseguenze derivanti dai radionuclidi ad alto livello di radiotossicità, in caso di incidente severo, non possono essere paragonate a quelle causate dalla CO_2. Va ricordato comunque che questo composto è un gas asfissiante a partire da una concentrazione nell'aria dell'8-10%, e pertanto non scevro dalla possibilità di generare uno scenario incidentale di vaste proporzioni; un esempio degli effetti devastanti del rilascio di grosse quantità di anidride carbonica si è avuto a seguito dell'improvvisa emersione dai fondali del Lago Nyos (Chad) di una massa di questo gas a seguito di uno smottamento avvenuto nel 1986, evento che provocò la morte per soffocamento di almeno 1.700 persone (Rice 2004).

Considerando che sono in discussione sistemi di accumulo di grandi quantità di CO_2 in depositi sotterranei, o sotto la superficie di bacini di acqua, un tale incidente è certamente da tenere in considerazione.

La CO_2 prodotta per TWh$_e$ varia da 0,5 mil. tonn. per un impianto

Fig. 1 - CONCETTO DI REATTORE NUCLEARE ADIABATICO



Fonte: Grasso et al. (2013).

a gas naturale a circa 1 mil. tonn. per un impianto a carbone; pertanto, per produrre un quarto del consumo di energia elettrica in Italia con combustibili fossili si generano circa 40-80 mil. tonn. di CO_2, a 25 °C e ad 1 atm; ciò corrisponde a un volume rispettivamente di 22,5 e 45 mld. m^3. Naturalmente il gas può essere compresso con consumo rilevante di energia e con conseguente aumento della quantità di CO_2 per unità di elettricità immessa in rete. La compressione, fino alla liquefazione, ridurrebbe il volume a circa 100 mil. m^3. Oltre alla CO_2 andrebbero studiate strategie di immagazzinamento e separazione dall'ambiente per gli altri composti dannosi come le ceneri e altri gas prodotti dalla combustione, in parte dispersi nell'ambiente.

Va anche segnalato che un mix energetico che comprenda impianti funzionanti sia con combustibili fossili con tecniche di sequestro e immagazzinamento (CCS), che con energie rinnovabili (intermittenti), aumenta la richiesta di metalli (Sn, Mo, Al, Fe, etc.) (Kleijn et al. 2011, UNEP 2013), con un peggioramento netto dell'impronta energetica sulla catena alimentare.

1.1. Valutazione del rapporto tra energia consumata ed energia prodotta

Come già menzionato l'EROI è un parametro fondamentale nella valutazione della sostenibilità ambientale: esso rappresenta il vero indicatore dell'efficienza energetica, anche se spesso ci si concentra solo sull'efficienza finale di utilizzo, senza percepire che questo è solo l'ultimo anello di una lunga catena.

Per confrontare i diversi risultati disponibili in letteratura, va precisata quale definizione di questa grandezza è stata adoperata, giacché ne esistono almeno quattro accezioni diverse; Rotty et al. (1975) forniscono una chiara definizione per ognuno di questi modi di intendere l'EROI. Nella Tab. 1 si mostra l'EROI finale, che è il rapporto tra l'energia finale ricavata e l'energia finale investita (R_3 secondo Rotty et al. 1975), per diversi fonti di generazione di elettricità ([5]).

Tab. 1 - **EROI FINALE PER DIVERSE FONTI DI GENERAZIONE DI ELETTRICITÀ**

Fonte di generazione	EROI finale
Carbone	30
Eolica	16
Fotovoltaica	4-7
Gas CCGT	28
Idroelettrica	40-250
Nucleare IV generaz. (reattore a piombo)	199
Nucleare III generazione	106
Solare termodinamico	17-21

Fonte: Weissbach et al. (2013).

Diverse variabili concorrono alla determinazione dell'EROI nelle centrali nucleari: la loro durata, il loro fattore di carico, il grado di purezza dei minerali da dove si estrae l'uranio, il livello d'irraggiamento del combustibile, l'efficienza nella conversione dell'energia termica in elettrica, l'energia necessaria a costruire e smantellare la centrale e, infine, la tecnologia di arricchimento dell'uranio. Riguardo quest'ultima, nel passato l'arricchimento avveniva tramite il processo di diffusione, tecnica già abbandonata da qualche tempo in favore dell'arricchimento mediante centrifugazione; tecnologia quest'ultima che ha permesso di ridurre di 40 volte il consumo di energia del processo.

Rispetto ai reattori raffreddati ad acqua il reattore adiabatico a piombo non comporta consumi energetici per l'arricchimento del combustibile, invece al suo posto compaiono i consumi per il solo riprocessamento del combustibile che, insieme agli altri contributi, fa sì che l'EROI finale dei reattori a piombo sia di 199 (Murray et al. 2011).

L'EROI dei reattori veloci è maggiore rispetto a quello dei reattori di terza generazione, in ragione:

– dell'aumento dell'efficienza della conversione energetica, ottenuta grazie alla temperatura del refrigerante molto più elevata;

– dei livelli di bruciamento del combustibile più spinti;

– della peculiarità dei reattori veloci di essere in grado, in determinate configurazioni, di generare il proprio combustibile.

Va segnalato che l'introduzione dei reattori veloci porterebbe anche un incremento della sostenibilità degli impianti di Gen. III, giacché il loro EROI sarebbe migliorato; i primi, infatti, sono in grado di produrre più combustibile di quanto ne consumino, offrendo così la possibilità ai reattori ad acqua di funzionare con un combustibile che ha un minor costo energetico.

Gli EROI degli impianti a combustibili fossili, in uno scenario energetico decarbonizzato, subiranno, al contrario, un notevole peggioramento a causa del consumo di energia necessario per l'immagazzinamento della CO_2 (sequestro, compressione e/o liquefazione, trasporto tramite condotti e stoccaggio in depositi sotterranei/subacquei, etc.). In conclusione, possiamo valutare favorevolmente, anche prendendo in considerazione le stime meno positive, il bilancio energetico dei reattori Gen. IV, paragonabile alle migliori prestazioni degli impianti idroelettrici e superiore a tutte le altre fonti.

1.2. Emissione di gas serra

Negli ultimi decenni è aumentata la preoccupazione, sia da parte della popolazione, che da parte delle istituzioni nazionali e internazionali, circa gli effetti provocati sul clima dai prodotti emessi nell'atmosfera durante la combustione. I rappresentanti degli Stati presenti alla Conferenza sul Clima di Parigi (COP 21) del dicembre 2015 hanno ribadito con forza gli impegni precedentemente adottati e destinati a ridurre le emissioni di gas serra nel prossimo futuro. L'Unione Europea intende abbassare il livello delle emissioni domestiche almeno del 40% rispetto a quelle del 1990 entro il 2030, e dell'80% entro il 2050. Tutti gli scenari energetici proposti per raggiungere tale obiettivo prevedono un notevole incremento dell'uso dell'elettricità, con un significativo contributo dalle fonti intermittenti di energia

rinnovabile (ERI) (European Commission 2011).

Le fonti ERI, quali il fotovoltaico e l'eolico, possono contribuire ad abbassare le emissioni di gas serra connesse alla produzione elettrica; ma un qualunque mix di produzione necessita di una riguardevole frazione di fonti programmabili, in grado di coprire a ogni istante la differenza tra richiesta e generazione. Come riportato dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Schlömer et al. 2014), tra le fonti di produzione elettrica disponibili oggi sul mercato, gli attuali reattori nucleari commerciali sono caratterizzati da livelli di emissione tra i più bassi in termini di g CO_2 eq/kWh, come mostrato nella Tab. 2, dove sono elencati i valori presenti in letteratura delle emissioni per tutte le fonti energetiche programmabili e non. Infatti, sebbene esista una forte variabilità nei valori trovati dai diversi autori per tutte le fonti, si osserva che in termini di CO_2 equivalenti le emissioni delle centrali nucleari si collocano tra quelle più ridotte.

1.3. Sostenibilità economica

La sostenibilità economica del nucleare deve essere valutata in confronto alle altre fonti energetiche con caratteristiche comparabili di dispacciabilità e di livelli di emissione di gas serra. Per queste tipologie di impianti, in particolare idroelettrici, geotermici, a combustibili fossili con CSS e biomasse, le valutazioni economiche sono influenzate da diversi livelli di incertezza, causati da:

– fluttuazione del costo dei combustibili;

– incertezze sulla tecnologia dei processi di sequestro e di immagazzinamento della CO_2;

– imprevedibilità dell'effettivo fattore di carico, determinato dalla percentuale di potenza intermittente installata con priorità di dispacciamento;

– remunerazione di impianti tradizionali a bassa percentuale di utilizzo mediante strumenti indipendenti dalla produzione;

– necessità di migliorare la capacità di variare rapidamente la potenza erogata;

– potenziamento della rete di distribuzione per connettere le zone di generazione con le zone di consumo a causa della localizzazione prevalente delle fonti intermittenti in alcune aree geografiche per lo più a bassa industrializzazione;

– miglioramento tecnologico della gestione della rete per prevenirne gli sbilanciamenti.

In particolare, per quanto concerne gli impianti nucleari si sono aggiunte ulteriori fonti di incertezza, elencate di seguito:

– forti oscillazioni dei prezzi delle materie prime;

– ulteriori modifiche impiantistiche rivolte a incrementare i livelli di affidabilità dei sistemi di sicurezza, risultate dalle esperienze maturate dopo gli eventi di Fukushima;

– lunghi ritardi nei tempi di costruzione di alcuni impianti per alcuni costruttori (ma non per altri), dovuti alla maggiore complessità degli impianti stessi e alla perdita di *expertise*, determinata quest'ultima dal lungo periodo di pausa nella costruzione di impianti nucleari;

– variabili finanziarie (quali tassi di interesse, tasso minimo di rendimento finanziario, accessibilità al credito, etc.).

La valutazione dei costi per i reattori di quarta generazione raffreddati a piombo è strettamente associata a quella dei reattori raffreddati ad acqua di terza generazione, in ragione della somiglianza degli impianti; pertanto di seguito sono analizzati i costi per questi reattori e messi a confronto con i costi delle altre fonti di energia.

Come già accennato, sono state escluse dal confronto le fonti non programmabili, principalmente per i loro diversi fattori di carico rispetto a qualsiasi fonte programmabile. Un eventuale confronto con le ERI andrebbe fatto abbinandole ad appropriati sistemi di immagazzinamento dell'energia che, qualora fossero realizzabili, le collocherebbero più che mai fuori mercato. La loro inclusione nella comparazione aprirebbe comunque un dibattito che va oltre le finalità di questo articolo. In secondo luogo, tenuto conto della necessità di rispettare i parametri di Kyoto e di assecondare le direttive europee, si è scelto di eseguire il confronto solo tra fonti con un livello ridotto di emissioni, considerando tra queste anche

Tab. 2 - **EMISSIONI DI CO_2 EQUIVALENTI DA DIVERSE FONTI DI ELETTRICITÀ** (1) **DISPOSTE SECONDO LA MEDIANA DECRESCENTE** (g CO_2 eq/kWh)

	Minimo	Mediana	Massimo
Tecnologie disponibili			
Carbone (carbone polverizzato)	740	820	910
Biomasse (co-combustione)	620	740	890
Gas (cicli combinati)	410	490	650
Biomasse (impianto dedicato)	130	230	420
Solare fotovoltaico (utility)	18	48	180
Solare fotovoltaico (domestico)	26	41	60
Geotermia	6	38	79
Solare termodinamico	8,8	27	63
Idroelettrico	1	24	2200
Eolico offshore	8	12	35
Nucleare (2)	3,7	12	110
Eolico onshore	7	11	56
Tecnologie in fase pre-commerciale			
CCS carbone (polverizzato)	190	220	250
CCS carbone (IGCC)	170	200	230
CCS gas (ciclo combinato)	94	170	340
CCS carbone (ossicombustione)	100	160	200
Energia marina	5,6	17	28

(1) Includendo gli effetti sull'albedo della terra, cioè la frazione della radiazione solare incidente sulla terra riflessa nello spazio.

(2) Le emissioni per un reattore a piombo sono valutabili tra 2 e 58 g CO_2 eq/kWh, con una mediana di 6,4.

Fonte: Schlömer et al. (2014).

le fonti fossili che si avvalgono di tecniche di CSS, a dispetto della difficoltà di valutare la quantità di CO_2 sequestrabile e i relativi costi associati a causa dell'immaturità della tecnologia CCS.

Il rapporto periodicamente redatto dall'*International Energy Agency* e dalla *Nuclear Energy Agency* dell'OECD (IEA e NEA 2015), basato sui costi reali degli impianti in funzione, è un'accurata e affidabile fonte per analizzare l'andamento dei costi dell'elettricità nelle diverse regioni del mondo e per le diverse tecnologie di produzione. Dall'analisi di Fig. 2, che mostra un'elaborazione dei dati di questo rapporto per un tasso di sconto del 7%, si conclude che:

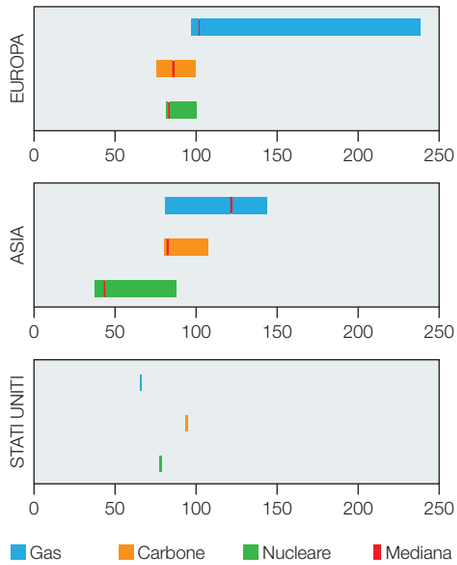
– i costi di produzione dell'elettricità sono strettamente legati alla corrispondente area geografica: la mediana del costo dell'energia nucleare varia da circa 44 doll./MWh per i paesi asiatici, passando per 78 doll./MWh negli Stati Uniti e superando gli 84 doll./MWh nei paesi europei;

– nel 2014 il costo dell'energia prodotta con il nucleare era il più basso rispetto alle fonti fossili tranne negli Stati Uniti per il gas ([6]).

Una valutazione autorevole dei costi futuri di generazione dell'elettricità è contenuta nel rapporto annuale sulle previsioni della spesa energetica degli Stati Uniti (EIA 2015), i cui dati sono riportati in Tab. 3.

Recentemente il Regno Unito ha stipulato un contratto per la costruzione di due centrali della filiera EPR, garantendo al costruttore un prezzo di acquisto dell'energia elettrica di 92,5 sterline/MWh (113 doll./MWh) per 35 anni, superiore del 19% al costo di produzione riportato in Tab. 3; tale accordo è stato criticato da numerosi osservatori e scelto come argomento dagli assertori della non sostenibilità economica dell'energia nucleare. Si noti comunque che il *Department for Business, Energy & Industrial Strategy* del Regno Unito dichiara che, per onorare gli

Fig. 2 - COSTO DELLA PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA PER DIVERSE FONTI PROGRAMMABILI ([1]) (doll./MWh)



(1) Si noti la forte variabilità tra le diverse zone geografiche.
Fonte: nostre elaborazioni su dati IEA e NEA (2015).

impegni di decarbonizzazione del Paese, nel prossimo decennio l'unica fonte programmabile disponibile risulta essere quella nucleare (DBEIS 2016) ([7]).

Nell'ambito del progetto LEADER, sono stati anche valutati i costi di produzione di energia elettrica per un reattore al piombo (Roelofs e Vazquez 2013), successivamente ulteriormente dettagliati e aggiornati (Ciotti e Manzano 2014). I risultati danno un costo di 82 euro/MWh, con una gamma di variabilità tra 62 e 110 euro/MWh, assumendo un tasso di sconto del 7%. Da queste valutazioni preliminari si può trarre la conclusione che, sia il costo per unità di potenza installata, sia il costo dell'elettricità dei reattori LFR sono dello stesso ordine di grandezza rispetto a reattori con sicurezza passiva Gen. III. In ogni caso, anche ipotizzando un costo addizionale del 10%, dovuto alla tecnologia innovativa, la sostenibilità economica di questi impianti si dimostra raggiungibile.

Tab. 3 - **COSTO DELL'ELETTRICITÀ PER DIVERSE FONTI DI ENERGIA** (doll./MWh)

Tipo di impianto	Levelised Cost per impianti entranti in esercizio nel 2020
A carbone (tecnologie avanzate con CCS)	144,4
A gas (cicli combinati avanzati con CCS)	100,2
Nucleare (tecnologie avanzate)	95,2
Geotermico	47,8
A biomasse	100,5
Idroelettrico	83,5

Fonte: nostre elaborazioni su dati EIA (2015).

1.4. Esternalità

Per avere un quadro completo sui costi dell'elettricità vanno anche considerate le esternalità. Da un approfondito studio sui costi dell'energia nucleare (D'haeseleer 2013) – effettuato per incarico della Direzione Generale Energia dell'Unione Europea e per il quale sono stati analizzati un centinaio di lavori e interpellati i principali attori del settore in Europa – emerge che i costi delle esternalità associate al funzionamento di una centrale nucleare sono nell'ordine di 2 euro/MWh, notevolmente bassi se confrontati con quelli di altre fonti programmabili; ad esempio, nel caso del carbone, i costi delle esternalità di funzionamento raggiungono i 31 euro/MWh.

D'haeseleer riporta come costo totale delle esternalità determinate dell'incidente di Chernobyl un valore di 360 mld. euro (in moneta 2005). Inoltre segnala, come conseguenza della forte diversità tra diversi autori nel determinare i costi di eventuali nuovi incidenti nucleari, la necessità di condurre nuovi studi. I costi per Fukushima sono stati stimati in 150 mld. doll. (in moneta 2014) («The Japan Times» 2014). Va notato che questi importi, per entrambi gli incidenti, se riportati all'energia totale prodotta da fonte nucleare, fanno aumentare il costo delle esternalità al massimo di alcuni euro per MWh.

2. CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati discussi i diversi aspetti della sostenibilità dei reattori veloci refrigerati a piombo. Il nuovo approccio concettuale applicato nella loro progettazione, basato su principi innovativi, assicura caratteristiche di

sicurezza intrinseca che riducono drasticamente il livello di rischio di questa tipologia di reattori.

La significativa riduzione della quantità di scorie prodotte e del loro livello di radiotossicità conferisce ai reattori a piombo un maggior grado di sostenibilità. L'ottimizzazione del ciclo del combustibile, con il raggiungimento in pratica della sua chiusura, basata sul concetto di reattore adiabatico, diminuisce notevolmente l'impatto ambientale e pone le basi per riconsiderare l'accettabilità dell'opzione nucleare da parte dell'opinione pubblica.

Le previsioni sugli EROI per i reattori Gen. IV in confronto a tutte le altre tipologie a emissione ridotta di CO_2 pongono questi impianti al vertice delle stime. Gli odierni reattori nucleari sono già competitivi rispetto alle altre fonti energetiche, mentre l'estrapolazione del confronto, a lungo termine, presenta innumerevoli incertezze. Il costo addizionale degli LFR, rispetto ai reattori a sicurezza passiva Gen. III+, è stato valutato in dettaglio nell'ambito del progetto LEADER ed è stato stimato nell'ordine del 10%.

L'obiettivo di ridurre drasticamente le emissioni di gas serra prima della metà del secolo, ci costringe a valutare il ricorso a nuove tecnologie di produzione elettrica in grado di raggiungere questo traguardo e che, al contempo, assicurino l'erogazione di energia a basso costo. Tutte le opzioni ipotizzabili, a livello di ricerca, vanno perseguite con lo stesso impegno. Il reattore adiabatico LFR costituisce una delle alternative. I reattori veloci raffreddati a piombo sono attualmente i migliori candidati per raggiungere l'obiettivo della riduzione delle emissioni e rappresentano una valida scelta per sostituire gli attuali reattori commerciali, una volta che questi abbiano esaurito il loro ciclo vitale.

Un'adeguata informazione sui rischi reali e i benefici connessi a tutte le fonti di energia per consentire ai cittadini una scelta serena, consapevole ed eticamente corretta fra le diverse opzioni energetiche è auspicabile.

Casaccia (Roma), Novembre 2016

NOTE

(1) Il contributo del nucleare a livello mondiale era del 19 % nel 1991; negli anni successivi la produzione di elettricità nucleare è aumentata raggiungendo un massimo nel 2006 (con un 30% circa in più rispetto al 1991), ma il suo peso percentuale è diminuito giacché la quantità di elettricità totale prodotta è passata da 10.617 TWh nel 1991 a 22.433 TWh nel 2014, incrementi coperti maggiormente con l'impiego di carbone e gas (dalle statistiche della Banca Mondiale elaborate nel sito goo.gl/yD45zC).

(2) Questi elementi, appartenenti al gruppo dei transuranici, sono i maggiori responsabili della radiotossicità di lungo periodo. Sono detti transuranici gli elementi chimici con numero atomico maggiore di 92; i più importanti nella fisica dei reattori nucleari sono il plutonio e gli attinidi minori: nettunio, americio e curio.

(3) Le ricerche teoriche e sperimentali sul piombo come fluido termovettore condotte dall'ENEA, da diverse Università e da industrie italiane hanno dato un contributo significativo al progetto LEADER (che è stato coordinato dell'Ansaldo Nucleare). Il sito goo.gl/wO3bZw offre una esaustiva descrizione di queste ricerche.

(4) Il livello di utilizzo del combustibile nucleare è espresso in GWd/t (GigaWatt-day/tonnellata) che denota quanta energia per unità di massa di combustibile (espressa in tonnellate) è stata estratta (1 GWd equivale a $86{,}4 \cdot 10^{12}$ Joule).

(5) Le definizioni degli EROI primario e finale (R_2 e R_3) sono:

$$R_2 = E_{OutEL}/E_{InEL} + E_{InTH}/w \qquad \text{e} \qquad R_3 = E_{OutEL}/E_{InEL} + E_{InTH}$$

dove E_{OutEL} è l'energia elettrica prodotta dal sistema, E_{InEL} e E_{InTH} sono le energie elettriche e termiche consumate dal sistema, e w è il costo della conversione da energia termica in elettrica (≈ 3) (Rotty et al. 1975).

(6) I costi dell'elettricità prodotta con energia nucleare sono minori dei costi dell'elettricità prodotta con energie rinnovabili intermittenti (perfino senza considerare i costi di bilanciamento provocati da queste) come riportato nelle figure ES1 e ES2 del citato rapporto.

(7) Valutazioni economiche puntuali, relative a tale impianto e alle strategie di decarbonizzazione intraprese dal Regno Unito, saranno oggetto di un articolo specifico in preparazione da parte degli autori.

BIBLIOGRAFIA

Artioli C. et al. (2010), *A new paradigm for core design aimed at the sustainability of nuclear energy: The solution of the extended equilibrium state*, in «Annals of Nuclear Energy», vol. 37, n. 7, pp. 915-922.

Ciotti M. et al. (2014a), *Lead Fast Reactor Sustainability*, in «Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-22)», paper 31092, ASME, ISBN 978-0-7918-4596-7.

Ciotti M. et al. (2014b), *Scenario analysis on the benefits of multi-national cooperation for the development of a common nuclear energy system based on PWR and LFR fleets*, in «Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-22)», paper 31012, ASME, ISBN 978-0-7918-4596-7.

Ciotti M. e Manzano J.L. (2014), *Studi e Valutazioni del costo del DEMO LFR ALFRED*, Rapporto ENEA ADPFISS-LP2-046.

DBEIS (2016), *Value for money assessment*, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, goo.gl/JhaBy5

D'haeseleer W.D. (2013), *Synthesis on the Economics of Nuclear Energy*, Final Report, Study for the European Commission, DG Energy, Contract n. ENER/2012/NUCL/SI2.643067, goo.gl/yFZzwK

EIA (2015), *Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources*, in *Annual Energy Outlook 2015*, U.S. Energy Information Administration, goo.gl/gsB1ka

European Commission (2011), *Energy Roadmap 2050: Impact assessment and scenario analysis*, SEC(2011) 1565 final, goo.gl/eYvY3F

Frogheri M. et al. (2013), *The Lead Fast Reactor: Demonstrator (ALFRED) and ELFR Design*, in «IAEA Proceedings Series, International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)», Paris.

Grasso G. et al. (2013), *A core design approach aimed at the sustainability and intrinsic safety of the European Lead-cooled Fast Reactor*, in «IAEA Proceedings Series, International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)», Paris.

IEA e NEA (2015), *Projected Costs of Generating Electricity: 2015 Edition*, Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency, ISBN 978-92-64-24443-6.

Kleijn R. et al. (2011), *Metal requirements of low-carbon power generation*, in «Energy», vol. 36, n. 9, pp. 5640-5648.

Murray M. et al. (2011), *Energy Return on Investment from the Operation of Recycle Facilities*, Contract n. DOE-NE0000291, RPT-3005597-000, Areva Federal Services LLC.

Rice S.A. (2004), H*uman health risk assessment of CO_2: survivors of acute high-level exposure and populations sensitive to prolonged low-level exposure*, Third annual conference on carbon sequestration, Alexandria, Virginia, USA (si veda anche goo.gl/sscKP1).

Roelofs F. e Vazquez M. (2013), *Cost estimation for the LFR and the ETDR*, 092-219-E-S-00001, goo.gl/Tu7erb

Rotty R.M. et al. (1975), *Net energy from nuclear power*, IEA Report IEA-75-3, Oak Ridge, TN, USA, Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities.

Schlömer S. et al. (2014), A*nnex III: Technology-specific cost and performance parameters*, in *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA.

Taylor J. (2002), *Sustainable Development: A Dubious Solution in Search of a Problem*, Policy Analysis Study n. 449, Cato Institute.

«The Japan Times» (2014), *Fukushima nuclear crisis estimated to cost ¥11 trillion: study*, 27 agosto, goo.gl/KSXMea

UNEP (2013), *Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles*, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, goo.gl/ZTwJwl

Weissbach D. et al. (2013), *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*, in «Energy», vol. 52, pp. 210-221.