

# POSSIBILI PROSPETTIVE PER UNA TECNOLOGIA NUCLEARE INNOVATIVA IN ITALIA. ANALISI CON UN MODELLO MARKAL.

Federico Santi, Dottorato di Ricerca

Università di Roma La Sapienza

## SOMMARIO

In questi anni di fermo degli ordinativi di centrali nucleari nel mondo occidentale, è stato sviluppato in Italia, dal Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversione dell'Energia dell'Università di Roma La Sapienza, un progetto di caratteristiche innovative, in grado di rispondere alle profonde trasformazioni in atto nei mercati energetici.

Il MARS (Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe) è un reattore a sicurezza intrinseca, di piccola taglia, modulare, a bassa produzione di materiale radioattivo, orientato anche al decommissioning, interamente prefabbricato in officina con brevi tempi di costruzione, in grado di produrre elettricità e calore per acqua potabile o teleriscaldamento.

Per lo sviluppo industriale del progetto possono prospettarsi due scenari possibili: uno vede l'industria energetica italiana occupare, grazie a questa tecnologia, una nicchia del mercato internazionale degli impianti nucleotermoelettrici; l'altro vede, in aggiunta e magari con un certo ritardo, l'installazione di impianti MARS anche sul territorio nazionale, con un contributo alla sostenibilità economica, sociale ed ambientale del sistema energetico italiano.

Questo secondo scenario è stato costruito e analizzato in dettaglio con un modello del sistema energetico italiano implementato ad hoc, della famiglia MARKAL, sviluppata negli ultimi 25 anni dall'International Energy Agency ed utilizzata da oltre 80 istituzioni di tutto il mondo.

## L'ENERGIA NUCLEARE TRA CRISI E SVILUPPO

L'energia nucleare soddisfa il 6% del fabbisogno energetico globale e copre il 17% della produzione mondiale di elettricità. Nell'Unione Europea queste quote si raddoppiano: un kilowattora ogni tre proviene dalla conversione dell'energia nucleare.

Sono in funzione nel mondo 441 unità nucleotermoelettriche<sup>1</sup>, di cui 104 negli USA e 150 nell'Unione Europea. Sono in costruzione 27 nuove unità, mentre una parte degli impianti più obsoleti, soprattutto negli USA<sup>2</sup>, attraversa una fase di relicensing e ripotenziamento che dovrebbe prolungarne la vita di qualche decennio.

Questo è il quadro dell'energia nucleare a poco più di cinquant'anni dal famoso discorso di Eishenower "*Atoms for Peace*" (8 dicembre 1953) e dall'inizio delle attività nucleari di tipo commerciale<sup>3</sup>.

Le originarie aspettative di diffusione delle tecnologie nucleari per usi energetici sono state in parte disattese. Nell'ultimo ventennio c'è stato un sostanziale rallentamento degli ordinativi di nuovi impianti. Le ragioni sono da ricercare

in quattro fattori di criticità della filiera tecnologica nucleare: economia; accettabilità sociale e sicurezza; gestione dei rifiuti radioattivi; rischi di proliferazione. Gli economics del nucleare (grandi concentrazioni di potenza, ingenti capitali, difficile bancabilità, lunghi tempi di costruzione, lunghissimi tempi di ritorno degli investimenti) mal si adattano all'apertura dei mercati energetici in atto in Occidente, tant'è che gli impianti attualmente in costruzione sono ubicati per lo più in Asia, Europa Orientale e America Latina. Anche perché il rischio finanziario è amplificato dalla scarsa accettabilità sociale: in Occidente guadagnare il favore delle popolazioni ad una qualsivoglia infrastruttura nucleare è molto difficoltoso. La gestione delle scorie – combustibile esaurito e materiali attivati provenienti soprattutto dallo smantellamento di impianti obsoleti – è un problema ancora aperto, anche e soprattutto sotto il profilo scientifico e tecnologico, almeno per quanto riguarda le pur esigue percentuali di rifiuti di radiotossicità millenaria. Infine, il rischio che organizzazioni destabilizzanti entrino in possesso di tecnologie e materiali per armamenti nucleari è ad oggi tutt'altro che scongiurato.

Il prodotto di questi quattro fattori è il freno all'installazione di nuovi impianti nucleari registrato negli ultimi lustri. Un ampio studio del MIT [1] pubblicato nel 2003, "*The Future of Nuclear Energy*", propone delle linee guida per affrontare queste criticità, insieme ad una prospettiva di sviluppo. Vi si osserva la necessità di costruire nel mondo circa 1.000 nuovi reattori nucleari nei prossimi cinquant'anni, se si vuole mantenere il contributo attuale dell'energia nucleare alla produzione elettrica mondiale.

Contributo peraltro essenziale per la sostenibilità del sistema energetico planetario: le emissioni antropogeniche di

<sup>1</sup> Ultimi dati ufficiali IAEA-International Atomic Energy Agency, riferiti al 25 gennaio 2005.

<sup>2</sup> Secondo i dati del NERC (Nuclear Energy Regulatory Commission), a fine 2004 negli USA 30 unità hanno ottenuto il pieno rinnovo della licenza per 20 anni, mentre per altre 18 il procedimento è ancora in corso e per un'altra ventina di impianti si prevede il relicensing entro il 2008.

<sup>3</sup> Inizia nel 1954 la costruzione del primo reattore nucleare occidentale di tipo commerciale (Shippingport, USA); nello stesso anno a Obninsk (Russia), un reattore produce il primo kilowattora nucleare della storia immesso in una rete elettrica.

gas a effetto serra annualmente evitate grazie all'energia nucleare ammontano oggi a oltre 500 milioni di tonnellate l'anno di carbonio equivalente [2], da confrontare coi circa 7 miliardi complessivamente rilasciati, mentre il minor consumo di risorse fossili supera l'equivalente di circa 600 milioni di tonnellate di petrolio su base annua.

In questo contesto, nel pieno delle profonde trasformazioni in atto nei sistemi energetici, ci si chiede se può esistere un futuro per l'energia nucleare in Italia.

Intanto, la situazione nazionale odierna è brevemente riassumibile: vi sono quattro centrali nucleari fuori produzione da oltre quindici anni e in fase più o meno avanzata di smantellamento, oltre a vari centri di ricerca nucleare, anch'essi ad attività molto ridotta nel settore specifico. È ancora aperto il problema della messa in sicurezza e del deposito definitivo dei materiali attivati. Nel computo del mix di fonti energetiche primarie per la produzione termoelettrica nazionale non sembra aver posto l'energia atomica, ma di fatto essa entra nel mix suddetto, essendo importata da Francia, Svizzera, Austria e Slovenia in misura pari ad oltre il 14% della richiesta complessiva nazionale annua di elettricità.

Su questa base, conditio sine qua non perché vi sia un qualche futuro possibile per l'energia nucleare in Italia è che nel mondo continui il rinnovato interesse per questa opzione energetica e si concretizzi uno sviluppo almeno ai livelli indicati dal succitato scenario del MIT. Il che pare stia avvenendo, come molti segnali provenienti da direzioni diverse spingono a credere.

Ciò posto, un riavvio del ciclo nucleare in Italia nelle forme tradizionali sembrerebbe poco percorribile. Tuttavia, proprio in Italia, grazie all'assenza di interessi pregressi nel campo dell'energia atomica, è stato possibile sviluppare una tecnologia nucleare innovativa e di caratteristiche tali da poter occupare una nicchia non trascurabile del settore a livello internazionale.

## LA TECNOLOGIA MARS

Il MARS [3], Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe, è un impianto nucleare innovativo, realizzabile in moduli di piccola taglia (150 MW elettrici, un terzo delle normali sezioni a gas naturale a ciclo combinato), assemblabili in numero variabile.

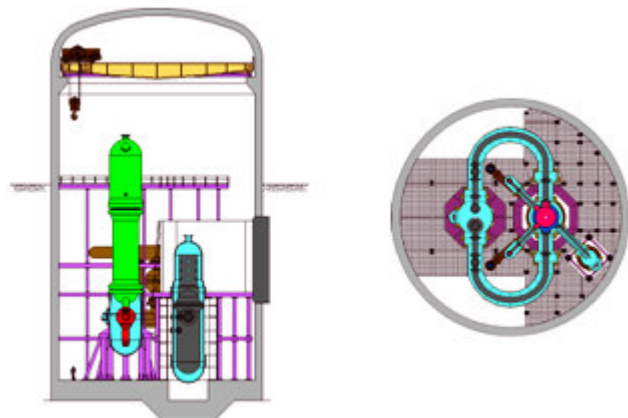


Fig. 1 Edificio del reattore MARS, sezione e pianta

È interamente in acciaio a collegamenti flangiati anziché saldati, completamente prefabbricato in officina e non richiede

lavorazioni in sito diverse dal montaggio. Questo rende agevoli e profondi i controlli di qualità, semplici e sicure le operazioni di installazione, ridotti i tempi e i costi di costruzione: meno di 4 anni dall'ordinazione per un singolo modulo *first mover*, ma si può arrivare a 3 anni dopo l'allestimento di alcune unità. Inoltre, la prefabbricazione integrale consente il facile trasporto in blocchi pre-assemblati dell'intero impianto sino al sito di installazione.

Ogni singolo componente si può già oggi ordinare sul mercato. In questo senso, il MARS non è un impianto di nuova generazione e non richiede ulteriore ricerca e sviluppo, ma è pronto per la realizzazione. Il suo combustibile è dello stesso tipo di quello dei reattori ad acqua pressurizzata, il più diffuso e reperibile sul mercato internazionale.

Dal punto di vista energetico, il MARS è cogenerativo: può produrre elettricità e calore ed è già progettato in una versione pronta a sfruttare il calore cogenerato per la produzione di acqua potabile mediante dissalazione dell'acqua di mare. Piccola taglia e produzione di acqua potabile rendono il MARS particolarmente adatto a quei Paesi in cui le reti elettriche non possono sopportare centrali produttive di grande taglia, tipica degli impianti nucleari tradizionali. Nelle stesse aree la carenza di acqua potabile, spauracchio del futuro per buona parte del Pianeta, è già oggi uno dei problemi più gravi.

Sotto il profilo nucleare, il MARS è una versione semplificata ed evoluta di impianto ad acqua pressurizzata ad un solo circuito primario. Oltre trent'anni di esperienza di esercizio in tutto il mondo per questo tipo di reattori rende la progettazione del MARS affidabile e non affetta da incertezze dovute all'introduzione di soluzioni non adeguatamente sperimentate.

Tuttavia, a differenza degli impianti ad acqua pressurizzata di nuova generazione, il MARS è a sicurezza intrinseca, ciò che insieme alla piccola taglia dovrebbe renderlo molto più vicino all'accettabilità sociale. Sicurezza intrinseca vuol dire funzionalità essenziali di sicurezza basate su ineludibili leggi di natura. Il bilanciamento di sistemi attivi e passivi tipico degli attuali reattori è sostituito o integrato da caratteristiche intrinseche, che per effetto di leggi naturali garantiscono lo spegnimento della reazione a catena (prima funzione) e la rimozione del calore residuo di decadimento (seconda funzione), indipendentemente dall'attivazione di appositi sistemi, dalla disponibilità di energia per compiere queste operazioni e soprattutto dall'intervento dell'uomo.

Non appena la temperatura supera soglie prefissate, il reattore si spegne e il calore di decadimento è rimosso attraverso un innovativo circuito di refrigerazione di emergenza, a tre stadi e circolazione naturale dei fluidi. Tale soluzione limita la potenzialità del MARS a poche centinaia di megawatt. Per questa ragione, la progettazione reattoristica ha storicamente optato per sistemi a sicurezza attiva e maggiori concentrazioni di potenza elettrica, onde favorire le economie di scala. Di esse il MARS non può beneficiare, ma grazie alla drastica semplificazione impiantistica consentita dalla piccola taglia e dalla sicurezza intrinseca consente riduzioni nei costi di investimento ancor maggiori [3, 4].

Il sistema di spegnimento automatico della reazione a catena opera per dilatazione differenziale di coppie bimetalliche inserite negli elementi di combustibile, che sono di fabbricazione assolutamente tradizionale.

L'esterno del circuito primario è pressurizzato allo stesso valore del suo interno (circa 70 atmosfere), mediante acqua a bassa entalpia. Questo consente di eludere le più importanti cause di incidenti pericolosi (perdita del refrigerante attraverso rotture del circuito primario, espulsione delle barre di

controllo) e di realizzare i collegamenti flangiati in sostituzione delle saldature, caratteristica peculiare del MARS.

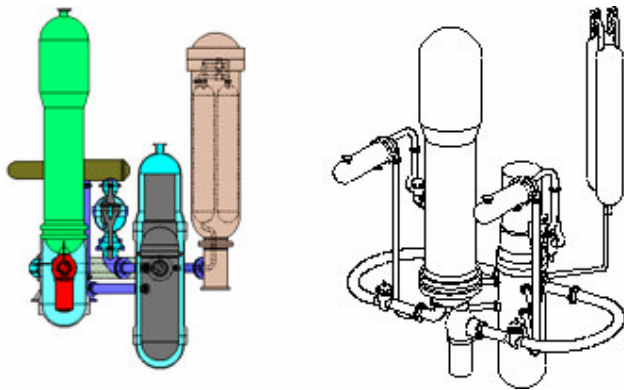


Fig. 2 Circuito primario pressurizzato a doppio contenimento e sistema di raffreddamento di emergenza del MARS

La sicurezza intrinseca rende fisicamente impossibili incidenti gravi nell'isola nucleare. Ciononostante, l'analisi di sicurezza del MARS è stata condotta comunque, ricorrendo alle tecniche analitiche più avanzate e considerando le situazioni più gravi concepibili. La probabilità massima di danneggiamento del nocciolo risulta di circa  $2 \times 10^{-8}$  eventi/anno: la probabilità che un meteorite cada su New York City è 5 volte più grande ( $1 \times 10^{-7}$  eventi/anno [5]).

Infine, il MARS è predisposto al decommissioning: a differenza degli impianti del passato, è pensato per facilitare al massimo e rendere molto più economiche le operazioni di smantellamento. Il decommissioning è già definito in sede progettuale e non riserverà sorprese a fine vita, come invece sta accadendo per gli impianti attualmente in smantellamento, i cui costi di decommissioning stanno lievitando rispetto ai valori inizialmente stimati per la difficoltà di organizzare razionalmente operazioni non considerate in sede progettuale. Per smantellare un reattore MARS basta scollegare e rimuovere i pezzi e i componenti in acciaio con le stesse macchine di movimentazione e sollevamento che li hanno montati, a costi quindi molto bassi.

L'orientamento del MARS al decommissioning si manifesta anche nel basso tasso di produzione di rifiuti radioattivi e nella facilità di gestirli: a fine vita, i materiali strutturali attivati possono essere semplicemente fusi direttamente nella forma in cui devono essere gestiti come rifiuti.

Altra peculiarità importante è l'attenzione, già in fase progettuale, alla vita tecnica del MARS e alle operazioni di manutenzione: l'impianto è tale da poter essere interamente sostituito, in ogni sua parte, compresa la strumentazione, che è la prima ad invecchiare. Questo ne allunga la vita a ben oltre sessant'anni, addirittura superando un secolo, secondo le analisi più recenti [7]. È evidente la convenienza economica di questa caratteristica del MARS che, una volta ammortizzato, è in grado di produrre elettricità e calore o acqua potabile a costi bassissimi, per ben due generazioni di centrali termoelettriche a fonti fossili.

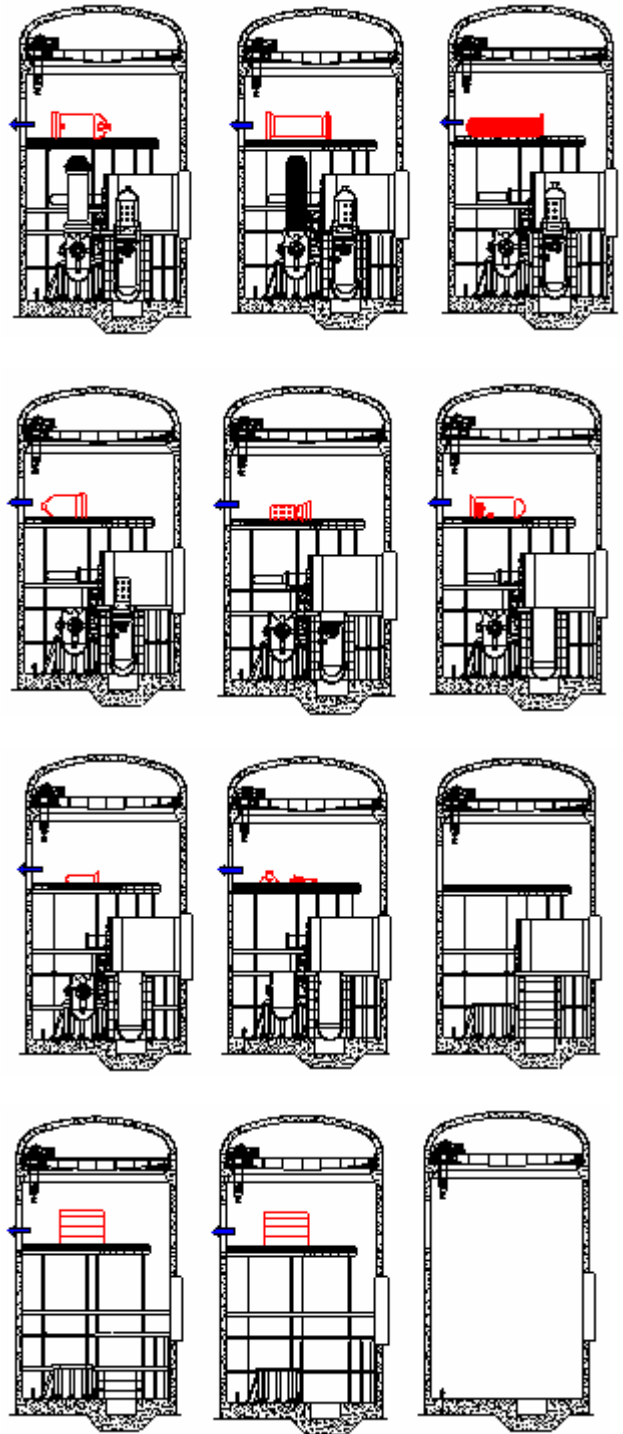


Fig. 3 Decommissioning del MARS, sequenza di smontaggio (generatore di vapore, vessel primario, componenti minori, schermo biologico) e vista dell'edificio senza strutture metalliche

## IL MARS COME OPPORTUNITÀ PER L'INDUSTRIA ITALIANA

Come detto, perché l'energia nucleare conservi la quota attuale della produzione elettrica mondiale almeno sino al 2050 è necessaria la costruzione di mille nuovi impianti nucleari da mille megawatt ciascuno, due terzi nei Paesi industrializzati e un terzo nelle aree in via di sviluppo [1]. Ai costi di costruzione odierni ne risulta un mercato impiantistico del valore attuale complessivo di circa 1200 miliardi di dollari da impegnare in meno di cinquant'anni.

Date le peculiarità del MARS rispetto alle ultime evoluzioni degli impianti nucleari di concezione tradizionale, si può immaginare che un segmento di questo mercato possa essere coperto dalla tecnologia MARS stessa, ad esempio per un 5%.

Infatti, almeno in quelle aree in cui la rete elettrica non sopporta grandi taglie di impianto e in cui la disponibilità di acqua potabile è un elemento critico per la sopravvivenza stessa delle persone, c'è senz'altro spazio per la tecnologia MARS, che può così contribuire all'elettrificazione delle aree povere del mondo con bassi impatti ambientali.

Per quanto riguarda i rischi di proliferazione, se si ha a che fare con un Paese che non ha ratificato il Trattato di Non Proliferazione (TNP) o che comunque presenta un certo grado di rischio di instabilità politica, è possibile prevedere – anche contrattualmente – la fornitura dell'intero nocciolo del MARS "sigillato" e la sua integrale sostituzione periodica ogni 5 anni, utilizzando combustibile opportunamente arricchito. In tal modo, nessun operatore locale potrebbe entrare in contatto con elementi di combustibile.

In un arco di tempo di cinquant'anni si potrebbero installare 300 moduli in cinquanta impianti sparsi nel mondo. Essi potrebbero arrivare a contribuire alla produzione elettronucleare mondiale per un 5% nel 2050, pari a poco meno di un centesimo dei consumi elettrici globali. Questo scenario aprirebbe un mercato per l'industria energetica italiana, che della tecnologia MARS può possedere ogni proprietà intellettuale, per oltre 85 miliardi di dollari nel periodo considerato. Già nel 2015, ad esempio, il volume di ordinazioni potrebbe arrivare a 3 miliardi di dollari (valore attuale), per raddoppiare nel 2020.

Per cogliere l'opportunità è necessario, a questo stadio in cui la progettazione ingegneristica del MARS è sostanzialmente terminata, realizzarne almeno un modulo onde dimostrarne la fattibilità operativa a fini commerciali e comprovare le peculiarità più vantaggiose.

Entro il 2010 è possibile la costruzione e l'entrata in esercizio di una centrale MARS di taglia pari a 450 MW elettrici (tre moduli) che, inserita nella rete elettrica, produrrebbe oltre 3 miliardi di kilowattora all'anno (equivalente al consumo medio annuo di novcentomila famiglie italiane), per oltre sessanta anni, finanche cento.

L'impianto consentirebbe di evitare ogni anno l'emissione diretta in atmosfera di 2,5 milioni di tonnellate di anidride carbonica, se confrontato con un moderno impianto a carbone di pari potenzialità (poco meno della metà se confrontato con un impianto a gas naturale a ciclo combinato). Per stoccare questa quantità di CO<sub>2</sub> in forma liquida in opportuno deposito geologico<sup>4</sup> occorrerebbe ogni anno uno spazio di oltre 2 milioni di metri cubi, pari a quello occupato da dodici grattacieli come il "Pirellone" di Milano. In alternativa, si dovrebbe far crescere un nuovo bosco di 5700 chilometri quadri, più esteso della regione Liguria, per assorbire l'intero ammontare delle emissioni.

Inoltre, il MARS non immetterebbe nell'ambiente circostante le molte centinaia di tonnellate di inquinanti gassosi (ossidi di zolfo, ossidi di azoto, particolato) rilasciate ogni anno da una centrale termoelettrica della stessa taglia.

Il MARS produrrebbe invece annualmente circa 130 metri cubi (un appartamento) di rifiuti a media e bassa radioattività e 2 metri cubi di rifiuti ad alta radioattività (poco più di una vasca da bagno).

<sup>4</sup> La pressione critica della CO<sub>2</sub> è 73,8 bar, per cui il deposito deve trovarsi a oltre 800 m di profondità, dati i gradienti idrostatici medi naturali (10,5 bar ogni 100 m).

Grazie alla prefabbricazione integrale ed alla semplificazione impiantistica, l'investimento oggi richiesto per l'installazione chiavi-in-mano (inclusi interessi intercalari) di un impianto con tre moduli MARS è di circa 700 milioni di euro, inclusa la quota destinata al decommissioning, ammortizzabile in 10 anni agli attuali prezzi medi all'ingrosso dell'elettricità (circa 60 €/MWh) e considerando un costo complessivo di esercizio di 15 €/MWh inclusivo di tutti gli oneri di combustibile, manutenzione, personale. Peraltro, se il MARS, date le sue caratteristiche ambientali e strategiche, beneficiasse del meccanismo incentivante dei Certificati Verdi previsto per gli impianti a fonte rinnovabile [7], l'ammortamento si coprirebbe in appena 5 anni.

Comunque sia, trascorso il periodo di ammortamento il MARS può garantire per oltre mezzo secolo la disponibilità di tre miliardi di kilowattora ogni anno ad un costo di produzione di gran lunga inferiore a quello delle migliori tecnologie termoelettriche a fonti fossili.

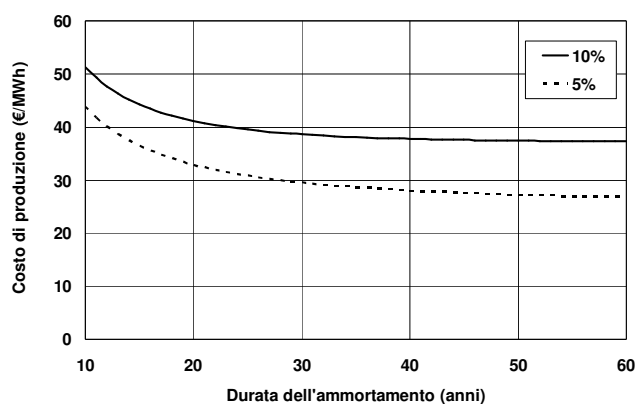


Fig. 4 Costo di produzione del MARS, inclusi investimento e decommissioning, in funzione del tempo di ammortamento

Se poi venissero monetariamente riconosciute al MARS le emissioni di CO<sub>2</sub> evitate, ad esempio attribuendogli un pari quantitativo di permessi di emissione da vendere sul mercato dell'Emission Trading<sup>5</sup>, la produzione elettrica, dopo l'ammortamento, potrebbe avere un costo addirittura nullo. Infatti, vendendo i permessi di emissione il MARS potrebbe incamerare fino a 20 €/MWh, a seconda del quantitativo di permessi di emissione attribuitigli, da portare in sconto nel costo del kilowattora che andrebbe pressoché ad annullarsi. È evidentemente un assurdo, ma al di là del riconoscimento monetario le emissioni evitate restano una realtà.

Certificati Verdi e/o permessi di emissione darebbero un riconoscimento alla valenza strategica del progetto MARS e un impulso all'industria energetica italiana per avviare la produzione di un primo impianto.

Per quanto riguarda l'integrazione del progetto MARS con la chiusura del vecchio ciclo nucleare, si osserva che il programma di decommissioning delle quattro centrali elettronucleari italiane (Caorso, Trino Vercellese, Garigliano e

<sup>5</sup> Secondo lo schema previsto dalla Direttiva Europea 2003/87/CE, che al momento non include le tecnologie nucleari. A regime, i prezzi dei permessi di emissione nel mercato europeo sono previsti in una forbice con valore medio intorno ai 25 €/t. Le emissioni evitate dal MARS possono essere determinate per confronto con quelle rilasciate da un nuovo impianto di pari taglia a gas naturale a ciclo combinato (365 kg/MWh) o a carbone (787 kg/MWh), oppure con un valore intermedio, ad esempio le emissioni medie specifiche del parco termoelettrico nazionale (635 kg/MWh nel 2000).

Latina) prevede un impegno di spesa complessivo di circa 2,65 miliardi di euro nel prossimo quindicennio. Così, la produzione nucleare italiana (92.5 TWh) avrà fatto registrare un costo "bruto" di smantellamento di circa 29 €/MWh<sup>6</sup>, decisamente superiore ai valori di letteratura e dovuto certamente al fermo anticipato degli impianti ancora funzionanti dopo il referendum del 1987, ma anche alla difficoltà tecnica di smantellare centrali per le quali il decommissioning non è stato adeguatamente progettato. Resta inoltre aperto il problema di reperire un sito per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi in opportuni depositi, date le fortissime opposizioni delle comunità locali. Problema che rischia portare in una pericolosa impasse il programma di decommissioning. Le criticità di questa situazione possono essere almeno in parte attenuate dalla costruzione di un impianto MARS in uno dei quattro siti nucleari a suo tempo autorizzati. Si avrebbe una sinergia benefica, dato che il MARS potrebbe sfruttare il sito e una parte dell'infrastruttura esistente, con risparmio sui costi di investimento. Una semplice verifica tecnica dello stato e della adattabilità delle apparecchiature elettriche e delle opere ausiliarie di centrale può consentire l'integrazione della progettazione del MARS con le infrastrutture esistenti. Ovviamente nulla vieta l'installazione *green field*, o su un qualsiasi sito industriale che venga qualificato per l'utilizzo nucleare.

## IL MARS COME BENEFICIO PER IL SISTEMA ENERGETICO ITALIANO

La realizzazione del primo impianto MARS potrebbe essere l'incipit di un secondo scenario, che vede il MARS trovare spazio non solo in una nicchia libera del mercato internazionale, ma anche nel sistema energetico italiano.

Spazio che si verrebbe a creare nell'arco di circa un decennio, quando la tecnologia del gas naturale a ciclo combinato, oggi in fase di diffusione, avrà raggiunto una penetrazione tale da rendere necessaria una diversificazione verso altre fonti, soprattutto per gli impianti in servizio di base. Le ragioni per puntare al MARS sarebbero più d'una.

Primo: un'eccessiva quota di gas naturale tecnologicamente obbligato nel parco termoelettrico potrà porre problemi di sicurezza degli approvvigionamenti e instabilità dei prezzi dell'elettricità.

Secondo: esaurita la riconversione a gas naturale del sistema termoelettrico nazionale, le emissioni di gas-serra prenderebbero nuovamente a crescere, allo stesso ritmo della domanda elettrica e mitigate esclusivamente dagli eventuali incrementi di penetrazione delle fonti rinnovabili, mentre le normative in materia diventeranno via via più stringenti.

Terzo: le fonti rinnovabili avranno maggiore diffusione, ma quelle in grado di sostituire le centrali termoelettriche in servizio di base non saranno probabilmente ancora mature.

Quarto: le nuove centrali a carbone (Clean Coal Technologies) sarebbero in tale contesto vincolate al sequestro e al deposito millenario della CO<sub>2</sub> prodotta [2], problema tecnico-scientifico ed economico delicato almeno quanto quello del deposito di rifiuti radioattivi.

<sup>6</sup> Se la somma di 2,65 miliardi di euro fosse stata accumulata durante gli anni di produzione gravando solo sulla produzione nucleare, ad esempio con l'accantonamento di un fondo ad un tasso di interesse medio annuo del 3% al netto dell'inflazione, il costo unitario dello smantellamento sarebbe stimabile in 20 €/MWh (valore attuale), comunque molto alto. In realtà, tutto il settore elettrico italiano ha contribuito a sostenere le spese del nucleare, compreso l'accantonamento del fondo per il decommissioning.

Quinto: la proprietà italiana della tecnologia MARS creerebbe ordinativi per l'industria nazionale e occupazione, evitando il trasferimento di somme all'estero per l'acquisto di impianti e commodities energetiche.

Ciò considerato, con metodi analitici rigorosi<sup>7</sup> è stato costruito uno scenario del sistema energetico nazionale che prevede l'installazione di 39 moduli entro il 2020, per una potenza elettrica installata complessiva di quasi 6 GW assemblabile, ad esempio, in 7 centrali.

In questa ottica, il *first mover* può essere un impianto costituito di tre moduli MARS, per una potenzialità complessiva di 450 MWe, come descritto sopra.

Il programma di installazione delle altre 6 centrali MARS può quindi avere inizio nel 2012, dopo tre anni di esercizio del *first mover*, in modo da sfruttarne per intero l'esperienza di costruzione. I 6 impianti da mettere in esercizio tra il 2012 e il 2021 sono composti ciascuno di sei moduli MARS (900 MW): si avvicinano così alla taglia di 1 GW tipica delle installazioni nucleari e possono sfruttarne le economie di scala. Tuttavia, per il MARS poco cambia se anziché 6 impianti da 900 MW si realizzano 12 impianti da 450 MW, data la modularità della tecnologia che ben si adatta anche al nuovo approccio di generazione distribuita e riduzione delle taglie.

Il primo kilowattora prodotto da un MARS potrebbe dunque essere immesso in rete entro il 2010. La produzione elettrica da MARS può poi crescere fino a un regime di 41 TWh/anno dal 2021 in poi, coprendo quasi il 10% del fabbisogno elettrico nazionale previsto per quell'anno. Ciò naturalmente nell'ipotesi del tutto ideale che i tempi necessari alle autorizzazioni siano ridotti al minimo tecnico di circa un semestre; in caso contrario, tutte le considerazioni continuano a valere, ma a partire dal momento in cui è completato l'iter autorizzativo.

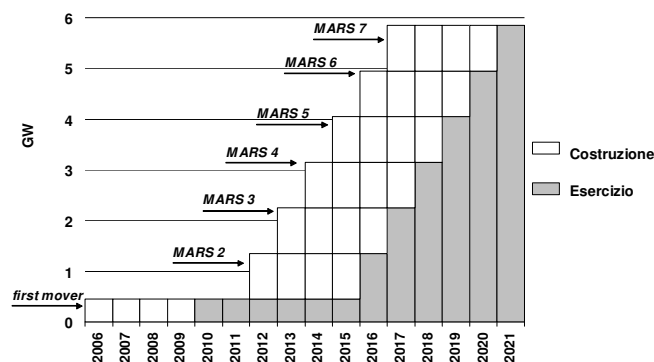


Fig. 5 Un possibile programma di costruzione di impianti MARS in Italia (first mover 450 MWe, impianti successivi 900 MWe)

<sup>7</sup> Utilizzando il generatore di modelli di sistemi energetici più diffuso al mondo, il MARKAL, sviluppato dall'Agenzia Internazionale per l'Energia di Parigi in un progetto (*Energy Technology System Analysis Project*) ormai ultraventennale, a cui partecipano le rappresentanze di quindici Stati membri. Il MARKAL è un sistema software in grado di gestire modelli complessi con milioni di equazioni che simulano il comportamento di network energetici di dimensioni variabili da livello locale a livello addirittura planetario, in orizzonti temporali fino a oltre mezzo secolo. Esistono nel mondo più di 80 modelli della famiglia MARKAL, in circa 40 nazioni diverse. Un'applicazione recente è quella del Dipartimento dell'Energia statunitense, che ha sviluppato un modello MARKAL multiregionale su scala planetaria per integrare la costruzione degli scenari energetici annualmente pubblicati nell'*International Energy Outlook*.

Dalle analisi risultano evidenti i benefici per l'evoluzione del sistema elettrico nazionale. Si evita di costruire nuove centrali termoelettriche nel decennio a cavallo tra il 2015 e il 2025. Si evita, cioè, la costruzione di complessivi 6 GW di nuove centrali di base, di cui due terzi a gas naturale e un terzo a carbone (o altri combustibili di basso pregio). Si evita così, ogni anno e per oltre 60 anni, l'emissione diretta di:

- 3.000 tonnellate di anidride solforosa (SO<sub>2</sub>);
- 2.000 tonnellate di ossidi azoto (NO<sub>x</sub>);
- 500 tonnellate di polveri;
- oltre 20 milioni di tonnellate di anidride carbonica

(equivalente all'assorbimento di una foresta grande due volte il Lazio).

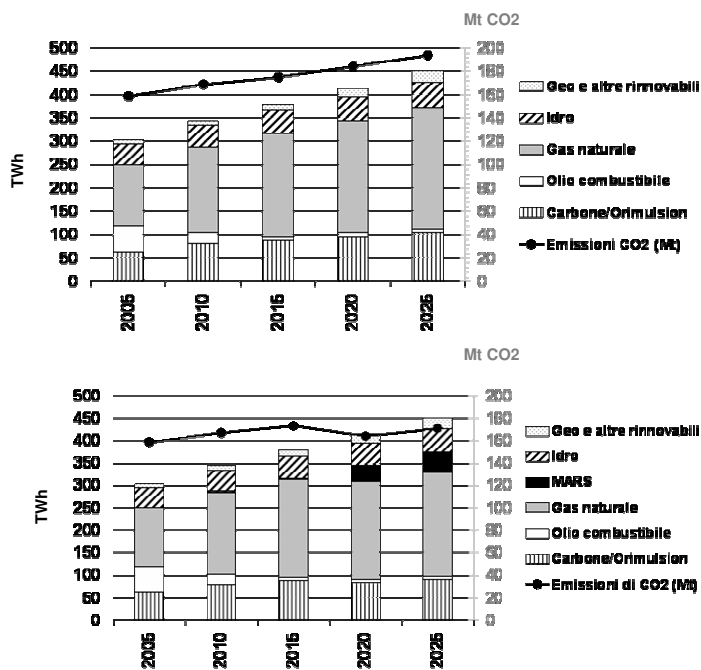


Fig. 6 Produzione lorda di energia elettrica in Italia e relative emissioni di CO<sub>2</sub>: scenario tendenziale (in alto) e scenario con attuazione del programma di costruzione di impianti MARS (in basso)

Si evita inoltre il rilascio degli effluenti solidi e liquidi dagli impianti chimici di controllo dei fumi delle centrali termoelettriche, nonché le emissioni inquinanti indirette dovute al trasporto di combustibili ed effluenti, da e per le centrali. Ancora, si evita l'importazione dall'estero di 4,5 milioni di tonnellate di carbone (45 navi carboniere all'anno) e di 5 miliardi di metri cubi di gas naturale. Si evita, cioè, la costruzione di un gasdotto di importazione di dimensioni paragonabili a quelle della nuova pipeline tra la Libia e la Sicilia (8 miliardi di metri cubi l'anno), ovvero di un terminale di rigassificazione del GNL (gas naturale liquefatto) più grande dell'unico oggi in funzione in Italia (Panigaglia), da 3,5 miliardi di metri cubi l'anno.

Last but not least, dal 2025-2030 e fin quasi alla fine del secolo si risparmiano ogni anno circa 460 milioni di euro (moneta costante) ai prezzi attuali dei combustibili fossili, peraltro previsti in crescita. Questa somma può costituire un profitto per gli esercenti delle centrali MARS, ovvero essere portata in sconto al prezzo di vendita all'ingrosso dell'elettricità a beneficio della competitività del sistema-Paese.

A fronte di questi benefici, ogni anno si producono 25 metri cubi di rifiuti solidi ad alta radioattività (una stanzetta) e 1700 a media e bassa radioattività (una palazzina a due piani), i quali possono essere permanentemente stoccati: i secondi in un deposito di superficie realizzabile in pochi anni senza difficoltà tecniche; i primi, dopo adeguato raffreddamento in superficie, in un opportuno deposito geologico che nel frattempo sarà allestito per ospitare i ben più voluminosi rifiuti già prodotti in passato. Nessun altro inconveniente sarà connesso con questo scenario. Infatti:

- la radioattività nelle aree circostanti le centrali MARS non supera in nessun caso quella corrispondente alla deviazione standard del livello di radioattività naturale;
- la protezione delle popolazioni che vi risiedono è garantita dalla tecnologia intrinsecamente sicura.

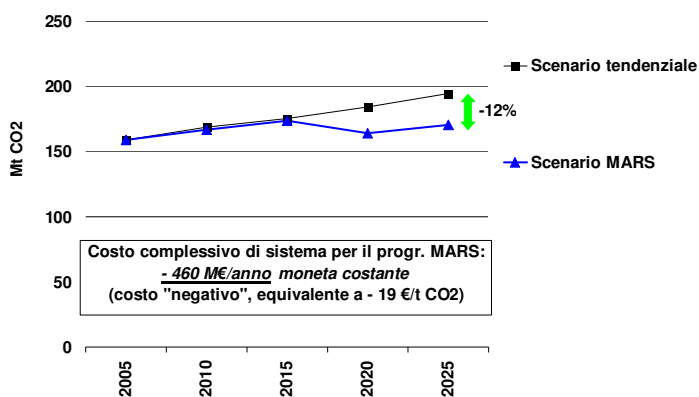


Fig. 7 Riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dal sistema elettrico italiano in seguito all'attuazione del programma di costruzione di impianti MARS. Risparmi economici ottenibili.

Comunque sia, al di là dei benefici direttamente ottenibili in Italia con la tecnologia MARS, realizzare almeno un impianto preparando la conquista di un segmento del mercato impiantistico mondiale è una sfida e un'opportunità a cui l'industria nazionale non dovrebbe rinunciare.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. AA.VV., The Future of Nuclear Power, Massachusetts Institute of Technology, 2003
2. Cumo M., Santi F., Simbolotti G., Energia, cambiamenti climatici e sequestro dell'anidride carbonica, La Termotecnica, giugno 2003
3. AA.VV., MARS Design Progress Report 2000, Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni dell'Energia
4. Cumo M., Nuovo nucleare: un possibile contributo italiano, Conferenza inaugurante l'a.a. 1992 dell'Accademia Nazionale delle Scienze
5. C.R. Chapman, D. David, Impacts on Earth by Asteroids and Comets: Assessing the Hazard, Nature, Vol. 367, Jan. 1994
6. Weinberg A. M., On "Immortal" Nuclear Power Plants, ANS annual meeting, Washington, 2002
7. Farinelli U., Santi F. et al., "White&Green": Comparison of Market-Based Instruments to Promote Energy Efficiency, Journal of Cleaner Production, II 2005