



Giunte e Commissioni

RESOCONTO STENOGRAFICO

n. 4

N.B. I resoconti stenografici di ciascuna indagine conoscitiva seguono una numerazione indipendente.

COMMISSIONI RIUNITE

7^a (Istruzione pubblica, beni culturali, ricerca scientifica, spettacolo e sport) e 10^a (Industria, commercio, turismo)

**INDAGINE CONOSCITIVA SULLE RICERCHE ITALIANE
RELATIVE ALLA FUSIONE NUCLEARE**

4^a seduta: giovedì 25 settembre 2008

Presidenza del presidente della 7^a Commissione POSSA

I N D I C E

Audizione del dottor David Maisonnier, rappresentante dello *European Fusion Development Agreement* (EFDA)

* PRESIDENTE	Pag. 3, 18, 19 e <i>passim</i>	* MAISONNIER	Pag. 3, 5, 18 e <i>passim</i>
DE FEO (PdL)	22		
* MESSINA (PdL)	5, 25		
VETRELLA (PdL)	22, 23, 25		

N.B. L'asterisco accanto al nome riportato nell'indice della seduta indica che gli interventi sono stati rivisti dagli oratori.

Sigle dei Gruppi parlamentari: Italia dei Valori: IdV; Il Popolo della Libertà: PdL; Lega Nord Padania: LNP; Partito Democratico: PD; UDC, SVP e Autonomie: UDC-SVP-Aut; Misto: Misto; Misto-MPA-Movimento per l'Autonomia: Misto-MPA.

Interviene il dottor David Maisonnier, rappresentante dello European Fusion Development Agreement (EFDA).

I lavori hanno inizio alle ore 14,30.

PROCEDURE INFORMATIVE

Audizione del dottor David Maisonnier, rappresentante dello *European Fusion Development Agreement* (EFDA)

PRESIDENTE. L'ordine del giorno reca il seguito dell'indagine conoscitiva sulle ricerche italiane relative alla fusione nucleare, sospesa nella seduta del 24 luglio scorso.

Comunico che, ai sensi dell'articolo 33, comma 4, del Regolamento, è stata chiesta l'attivazione dell'impianto audiovisivo e del segnale audio e che la Presidenza del Senato ha già preventivamente fatto conoscere il proprio assenso. Se non si fanno osservazioni, tale forma di pubblicità è dunque adottata per il prosieguo dei lavori.

È oggi in programma l'audizione del dottor David Maisonnier, rappresentante dello *European Fusion Development Agreement* (EFDA), e responsabile del progetto DEMO, il reattore il cui scopo è la dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica del processo di fusione termonucleare per la generazione di energia elettrica e che confidiamo possa subentrare a tempo debito alla sperimentazione avviata con il progetto internazionale ITER.

Ringrazio sin d'ora per la sua gentilezza il dottor Maisonnier che ha scelto di svolgere la propria relazione in italiano, facilitando così notevolmente il nostro lavoro; tengo anche ad informarlo che quanto dirà, comprese le riposte che vorrà fornire agli eventuali quesiti posti dai colleghi, sarà oggetto di resocontazione stenografica e consultabile su Internet e quindi fruibile sia da parte dei commissari, sia dei soggetti interessati alla materia.

Cedo quindi la parola al dottor Maisonnier.

MAISONNIER. Desidero innanzi tutto ringraziare i presenti per avermi concesso il piacere e l'onore di illustrare in questa sede il lavoro svolto ai fini della realizzazione della strategia europea per lo sviluppo della fusione nucleare, in particolare per quanto concerne il progetto DEMO e più generalmente riguardo ai futuri reattori di fusione.

Mi scuso inoltre anticipatamente se nel corso del mio intervento utilizzerò espressioni linguisticamente non propriamente corrette; infatti, nonostante il mio italiano sia tutto sommato discreto, essendo di nazionalità francese temo di non dominare a pieno le sottigliezze della vostra lingua.

Tengo anche a precisare di aver ampliato la mia illustrazione sul progetto DEMO – per la quale ai fini di una maggiore chiarezza mi avvarrò della proiezione di alcune *slide* esemplificative - anche ad altre problematiche per ragioni che auspico potranno essere chiarite dalla consultazione degli indici delle schede contenute nella presentazione che mi accingo a commentare e che depositerò agli atti delle Commissioni.

Nell'ambito della mia relazione, al di là di alcune considerazioni preliminari, mi è sembrato innanzitutto opportuno rispondere alla domanda: che cosa è DEMO? Sono infatti convinto che se si rivolgesse questa stessa domanda ai vari soggetti che operano nell'ambito di questo programma, ciascuno fornirebbe al riguardo risposte che, se pur lievemente, sarebbero comunque diverse l'una dall'altra, il che potrebbe anche dare luogo a discussioni assai delicate sul piano tecnico, visto che gli elementi di riferimento non risulterebbero esattamente gli stessi.

Sostanzialmente per questa ragione ho ritenuto utile in primo luogo chiarire che cos'è DEMO nell'ambito dello studio in corso. Ciò mi porterà a soffermarmi sulla strategia europea per lo sviluppo della fusione e sui reattori di fusione, ossia il prodotto ultimo del nostro sviluppo, per poi addentrarmi più specificatamente nelle problematiche di DEMO e quindi pervenire alle conclusioni.

Quanto alle considerazioni preliminari, non credo sia necessario che mi dilunghi sul processo di fusione termonucleare, posto che le Commissioni hanno già avuto modo di audire al riguardo il professor Roberto Petronzio, presidente dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN). L'unico aspetto che mi sembra in proposito opportuno sottolineare è che il plasma costituisce quel quarto stato della materia dove i nuclei sono separati dagli elettroni e che a temperature molto elevate non può essere contenuto in un oggetto materiale. Per «confinare» il plasma (nuclei separati dagli elettroni con particelle cariche elettricamente, negativamente o positivamente) sono possibili diverse configurazioni magnetiche (bottiglie magnetiche). Tra queste il tokamak (corrispondente all'acronimo di un nome russo inventato negli anni Cinquanta) permette di contenere il plasma nella forma di una «ciambella fritta» e di utilizzare questa struttura in base allo stesso principio di un trasformatore in cui il plasma ha la funzione del sistema secondario del circuito elettrico.

Questa configurazione è stata la più studiata tra le diverse possibili e fino ad oggi costituisce anche quella che ha dato i migliori risultati. Nella stragrande maggioranza dei casi è stata infatti utilizzata in diversi studi sui reattori sia in Europa che, in particolare, in America e in Giappone.

Visto che stiamo facendo riferimento ai reattori, mi sembra opportuno spendere qualche parola anche in tema di energia. La reazione ottenuta attraverso la fusione di un atomo di deuterio e uno di trizio dà vita, da un lato, al nocciolo di una particella di elio, la particella *alfa*, e dall'altro a un neutrone. Il neutrone, essendo neutro dal punto di vista elettrico, esce fuori dal campo magnetico e viene poi utilizzato per la produzione di trizio e per recuperare energia allo scopo di generare elettricità o per qualsiasi altro fine (produzione di idrogeno o altro). La particella *alfa*, essendo

elettricamente carica, rimane intrappolata nel campo magnetico e cede progressivamente la sua energia al plasma. Ciò permette di autoriscaldare totalmente o parzialmente il plasma. In termini di bilancio energetico, il 20 per cento dell'energia della fusione, essendo portato dalla particella *alfa*, è quello che viene ridistribuito nel plasma. Ciò consente di affermare molto semplicemente che l'energia necessaria per mantenere la reazione di fusione è data dalla somma dell'energia delle particelle *alfa* (energia auto-generata) e dell'energia che è necessario iniettare con metodi esterni per riscaldare il plasma (potenza di riscaldamento addizionale).

Se consideriamo qualsiasi reattore che produca elettricità anche con l'utilizzo del fotovoltaico, l'eolico o quant'altro, potremo riscontrare che una parte della potenza è sempre utilizzata nell'ambito del reattore stesso, se non altro per garantire energia elettrica agli uffici, o, come accade in qualsiasi centrale termica, per far circolare il fluido di raffreddamento. È ovvio quindi che un reattore diventa interessante dal punto di vista energetico quando l'energia prodotta in totale supera in termini ragionevoli quella ricircolata.

Nell'ambito della ricerca sulla fusione è stato definito un rapporto tra energia di fusione e energia di riscaldamento addizionale perché ciò permette di apprezzare, da un lato, la qualità delle reazioni di fusione che hanno luogo e, dall'altro, il fatto che in molti reattori (non in tutti), l'energia ricircolata è principalmente quella da riscaldamento addizionale. Quanto alla mia presentazione, ho introdotto comunque il fattore di guadagno energetico Q , molto utilizzato dai nostri ricercatori, anche se da un punto di vista di sistema sarebbe più saggio utilizzare il rapporto tra la potenza di fusione e quella totale ricircolata nel plasma, che in un reattore dovrà essere superiore a 15.

MESSINA (*PdL*). 15 è un fattore moltiplicatore?

MAISONNIER. Lo è rispetto alla potenza iniettata, ma non rispetto alla potenza totale ricircolata. Il vero fattore moltiplicatore durante il funzionamento è dato dal rapporto tra la potenza di fusione e la potenza totale dei sistemi ausiliari. Tra l'altro, anche questa è una nozione discutibile, perché per calcolare il bilancio energetico totale del reattore si dovrebbero considerare l'energia spesa per la costruzione dello stesso e quella impiegata per lo smaltimento delle scorie. Devo dire che il bilancio energetico è un'operazione da cui facilmente possono trapelare messaggi che definirei forse – se mi è concessa l'espressione – non del tutto onesti.

A partire da queste considerazioni, è possibile osservare che in un reattore di fusione, per avere un guadagno energetico ragionevole, la potenza fusione totale dovrà essere pari ad almeno 3 GW termici.

Desidero inoltre precisare che essendo questa una presentazione principalmente, se non esclusivamente, di carattere tecnico, ho cercato di includere in essa qualche dato numerico proprio per delineare degli ordini grandezza che però, riferendosi a reattori che vedranno la loro realizzazione in un futuro distante, hanno in taluni casi margini di errore.

Un ultimo aspetto teorico riguarda la possibilità di individuare quello che abbiamo definito il «tempo di confinamento» che caratterizza l'isolamento termico del plasma. Il plasma è una sorgente di calore che produce energia e che tende a disperdere calore, ora è evidente che una dispersione molto veloce del calore costituisce un fattore negativo perché significa che il plasma è meno isolato. Il parametro che abbiamo utilizzato nel grafico riportato nella *slide* proiettata serve dunque a caratterizzare il rapporto tra l'energia totale termica o energia di fusione e l'insieme di tutte le perdite. Tale parametro può essere previsto con grande precisione, dato per scontato che le leggi non sono necessariamente le stesse per tutte le macchine europee che utilizzano plasma, ma sono comunque valide se riferite alle diverse sezioni del grafico. Da questo punto di vista è importante osservare come, nella sezione che ci interessa (ossia quella relativa alle macchine JET-ITER-DEMO), il tempo di confinamento dell'energia sia proporzionale al quadrato del raggio del plasma e all'intensità della corrente dello stesso. Dal momento che – come facilmente dimostrabile – vi è l'esigenza di un parametro dell'ordine di due o quattro secondi, sfortunatamente occorre anche potersi avvalere di macchine di dimensioni importanti, come si può peraltro osservare nel grafico, confrontando la sezione della macchina ITER con quella relativa alla macchina JET, che è il più grosso tokamak oggi in funzione. Ciò in sostanza sta a significare che, pur essendo ITER una macchina utilizzata per una ricerca, se non avesse determinate dimensioni non potrebbe conseguire gli obiettivi che si prefigge. Questa costituisce una grande differenza rispetto, ad esempio, a precedenti programmi di ricerca in materia di fissione nucleare nell'ambito dei quali è stato possibile utilizzare macchine con potenze di kilowatt, laddove gli odierni reattori producono Gigawatt. Ciò, ripeto, non è però attuabile nella ricerca sulla fusione nucleare la cui sperimentazione sfortunatamente richiede l'adozione di macchine assai più costose.

Dopo questi brevi cenni sulle condizioni preliminari vorrei ora soffermarmi sul Programma di fusione europeo il cui scopo ultimo è dimostrare la fattibilità scientifica, tecnologica ed economica della fusione, e quindi fornire tutte le informazioni utili a consentire ad un produttore di energia elettrica, che si dimostri pronto ad assumersi il rischio, di costruire il primo un reattore a fusione finalizzato a produrre elettricità.

Per conseguire questi obiettivi si è ritenuto opportuno: definire le caratteristiche di un reattore, ovvero del prodotto ultimo; determinare le ulteriori conoscenze necessarie alla costruzione dello stesso; infine, definire un piano logico, credibile e coerente con il *budget* per colmare il divario tra le conoscenze attuali e quelle necessarie per la realizzazione del reattore, per pervenire poi al prodotto finale.

Le conoscenze di base necessarie per costruire il primo reattore si possono riassumere in pochi termini dietro ai quali vi è però un rilevante contenuto. In sintesi, prima di procedere a tale realizzazione, occorre innanzi tutto che la sua fisica sia perfettamente dimostrata e che i componenti ed i processi utilizzati siano qualificati. Insisto su quest'ultimo concetto di qualificazione, che può essere inteso in diversi modi e che in que-

sto caso sta a significare che dovrà essere costruito un prototipo e che esso sarà chiamato ad operare in condizioni simili a quelle incontrate in un reattore e per un tempo comparabile alla sua vita. Ci stiamo quindi riferendo a un requisito molto forte che va ovviamente applicato a tutti i processi e a tutti i componenti.

Ulteriore condizione è poi la dimostrazione sia della piena realizzazione dei criteri ambientali e di sicurezza, sia dell'accettabilità economica del progetto e riguardo a quest'ultima, più che sulla valenza economica dello stesso, la nostra attenzione si sofferma sulla accettabilità, posto che svariate fonti di energia sono oggi utilizzate non perché meno care, ma in quanto vengono accettate e per ragioni anche molto diverse l'una dall'altra. Ciò premesso, è evidente che il divario principale tra ITER ed il primo reattore riguarderà la qualifica dei componenti e dei processi e su questo aspetto tornerò a soffermarmi anche più avanti.

Nella *slide* alla vostra attenzione potete ora osservare una rappresentazione grafica del Programma di fusione europeo, nell'ambito del quale il presente è ITER e il futuro il reattore del quale dovremo dimostrare accettabilità economica e rispetto dei requisiti prima menzionati, sapendo però che spetta ad ITER attestare la fattibilità scientifica e, parzialmente, quella tecnologica del programma. Tra questi due elementi – ovvero ITER e la realizzazione del reattore a fusione – si colloca il programma DEMO, uno strumento che ci permetterà di compiere un grande passo in avanti, ma che è assai difficile da definire in termini di obiettivi, se non implicitamente, posto che non sappiamo ancora se il risultato cui si perverrà dovrà essere più vicino a ITER o al reattore che costituisce, comunque, il fine ultimo.

Riassumendo, si può dire che l'obiettivo di ITER è la fattibilità scientifica, ovvero la dimostrazione della fisica con un Q elevato, e che la tecnologia per esso sviluppata è unicamente quella necessaria alla sua costruzione, e che ciò rappresenta un grande passo avanti sul piano tecnologico. Molte delle tecnologie in esso utilizzate verranno certamente applicate nella realizzazione del reattore, pur non essendo assolutamente sufficienti, il che porta dunque ad affermare che l'obiettivo principale di DEMO è proprio quello di qualificare componenti, in particolare i famosi *blanket* per la produzione di trizio, e più in generale qualsiasi componente la cui tecnologia sviluppata in ITER non risulti idonea per un reattore.

Al riguardo è in particolare opportuno sottolineare l'aspetto nucleare; va infatti considerato che questa reazione di fusione produce neutroni molto energetici e benché ITER utilizzerà tale reazione deuterio-trizio, la quantità di neutroni prodotti – dunque la fluenza – risulterà comunque molto debole e non rappresentativa tanto da non permettere di qualificare alcun componente nucleare. Ciò determina la necessità di dotarsi di uno strumento, che può essere DEMO o anche altro, al fine di qualificare i famosi componenti interni – per utilizzare un termine della fissione – con una quantità di neutroni sufficienti al processo.

Rappresenta un esercizio molto delicato anche fornire una scaletta dei tempi necessari alla realizzazione del programma, tenuto conto che di so-

lito vi è la tendenza a soffermarsi sull'aspetto forse meno importante ovvero quello delle date. Nella *slide* ora proiettata viene riportato un grafico con un'ipotesi della tempistica del programma, che ho sviluppato nell'ambito del famoso *Strategic energy technology plan*, di cui mi risulta che il dottor Octavi Quintana Trias abbia fatto menzione nel corso della sua audizione. Questa scaletta dei tempi è stata elaborata l'anno scorso e non è aggiornata rispetto a ITER, ciò al fine di mantenere i riferimenti e in qualche modo sottolineare che i tempi non sono così importanti. Tale scansione temporale permette tuttavia di illustrare con chiarezza la situazione: nel grafico al vostro esame i tempi di costruzione relativi ad ITER sono evidenziati in rosso e vengono previste due fasi di operazione. In alto viene segnalata una *facility* (IFMIF), una macchina per la qualifica dei materiali, a dimostrazione anche del fatto che il programma ITER, così come quello DEMO, non si risolvono unicamente nella macchina che verrà realizzata, ma anche in una importante ed essenziale parallela attività di ricerca. In particolare, questa *facility* (IFMIF) serve a qualificare i materiali per DEMO, laddove ITER non può farlo; ciò sta a significare che oltre ad ITER si fa riferimento anche a IFMIF e ad altre apparecchiature (basti pensare alle esperienze italiane del tokamak sperimentale FTU situato nei laboratori dell'ENEA a Frascati o all'impianto RFX di Padova) essenziali per lo sviluppo della fisica e delle tecnologie necessarie alla realizzazione di DEMO cui dovrà contribuire parallelamente un programma di ricerca e sviluppo che allo stato ovviamente non è ancora molto ben definito.

Attualmente quello che possiamo ipotizzare è che per la progettazione di una macchina come DEMO occorreranno circa dieci anni, così come per ITER, e che tempi analoghi occorreranno anche per la sua costruzione. La difficoltà in questo caso è collocare la tempistica riguardante DEMO rispetto a quella di ITER; come si evince dal grafico, abbiamo cercato di farlo in un modo che reputiamo tecnicamente ragionevole (il che ovviamente non ha niente a che vedere con la decisione finale) e cioè anticipando la parte della progettazione (che nella *slide* è segnalata dal colore blu) sulla base di un investimento altrettanto ragionevole, e ritardando la decisione della realizzazione, nell'ambito della quale gioca un ruolo rilevante il *budget* necessario, a quando ITER avrà dimostrato la fisica del reattore (il che è previsto avvenga alla fine della fase 1); la freccia gialla che compare nella *slide* sta per l'appunto ad evidenziare il legame tra la scansione temporale relativa a ITER e quella che fa riferimento a DEMO.

Una volta data una scaletta dei tempi e definito uno scenario di massima, diventa ovviamente possibile anche valutare eventuali alternative, in primo luogo quelle volte a mitigare i rischi. Dal punto di vista tecnico, si può sempre valutare il rischio insito in un programma e cercare di mitigarlo, non necessariamente abbreviando i tempi, ma ad esempio prevedendo uno specifico piano di sviluppo.

È poi possibile intervenire attraverso una riduzione degli obiettivi. Ad esempio, come già sottolineato, per quanto riguarda gli obiettivi di DEMO c'è ancora spazio di manovra nell'ambito di quella che ho definito latitu-

dine delle sue finalità, tant'è che se oggi si cerca di riassumerli, si parla di funzionamento continuo, di alta disponibilità e di accettabilità economica. Siamo quindi nelle condizioni di fornire un'alternativa allo scenario ipotizzato, riducendo parzialmente alcuni di questi obiettivi pur sempre mantenendo lo scopo ultimo che è poi quello di qualifica dei componenti e dei processi.

Ultimamente si sta ad esempio immaginando la possibilità di realizzare più macchine DEMO, eventualità che a prima vista potrebbe sembrare singolare, ma che costituisce a mio avviso un'ipotesi molto ragionevole: si può infatti supporre che tra 20 anni la fisica ed i risultati di ITER saranno ormai scontati e che quindi sarà possibile effettuare valutazioni anche sul piano strategico e industriale che potrebbero anche spingere diversi Paesi, sia in Europa che negli Stati Uniti, a realizzare più DEMO. Sotto questo profilo, si può ipotizzare anche in questo campo e senza dover necessariamente ricorrere ad accordi formali di cooperazione – come nel caso di ITER – di dare vita a scambi di natura scientifica tra Paesi, scambi che avrebbero sicuramente delle ricadute positive in termini di sviluppo della ricerca sulla fusione. Allo stato non credo che nessuno sia in grado di dire di quale tipo di accordo o di scambio si debba trattare, purtuttavia ritengo che la possibilità di dotarsi di più DEMO rappresenti un dato positivo anche in termini di riduzione dei rischi.

Come già evidenziato, credo che prima di parlare di DEMO sia comunque importante avere prima un'idea del reattore. Vorrei dunque presentare brevemente il *power plant conceptual study* (PPCS), ovvero lo studio concettuale di reattori a fusione che abbiamo condotto in Europa e che è stato completato a metà del 2005. Tale studio è stato avviato con l'obiettivo di valutare lo stato della ricerca sulla fusione e di contribuire alla definizione delle future priorità del programma di ricerca europeo sulla fusione. A tal fine sono stati sviluppati 5 modelli di reattori (che abbiamo definito A, AB, B, C e D) che hanno alcune caratteristiche comuni, visto che tutti hanno una configurazione tokamak e un funzionamento in modo continuo, ma che sono dotati di diversi livelli di estrapolazione, sia sul piano della fisica che su quello tecnologico, considerato che si passa da modelli con estrapolazioni modeste al modello D (ove la *d* sta per «*dream*», ovvero sogno) che è molto avanzato e sul quale non mi soffermerò. La ragione per cui abbiamo ritenuto opportuno sviluppare diversi modelli è dovuta sostanzialmente al fatto che allo stato non siamo in grado di definire né dal punto di vista della fisica, né della tecnologia, quale sarà il modello di reattore cui si addiverà. D'altro canto, disporre di uno spettro più ampio di possibilità attraverso lo sviluppo di diversi modelli può aiutarci a capire se, ad esempio, ricorrano proprietà e caratteristiche valide in tutti i casi e in grado di assicurare determinati livelli di rendimento del futuro reattore.

A meno che non vi siano domande specifiche in proposito, non mi soffermerò sulle basi fisiche e tecnologiche, limitandomi a sottolineare che i primi tre modelli di reattore (A, AB e B) hanno una fisica comparabile ad ITER (+30 per cento), si avvalgono di tecnologie diverse tra di

loro e presentano un grado di estrapolazione limitato, laddove i modelli C e D, dal punto di vista sia fisico che tecnologico costituiscono modelli più avanzati.

Quanto ai parametri dei modelli, la prima questione che si pone è come effettuare una comparazione tra reattori. Al riguardo, abbiamo considerato che la maniera più logica fosse valutare la potenza erogata in rete, prendendo a riferimento dei modelli della potenza di circa 1,5 GWe, così come si evince nella *slide* al vostro esame. Per quanto concerne il modello B, sottolineo che nel corso di successive analisi ci siamo resi conto della necessità di apportare alcune correzioni, tant'è che nel grafico in alto a sinistra della medesima *slide*, laddove sono riportate le sezioni del plasma, compreso il plasma del modello B, quest'ultimo è stato riportato a 1,5 GWe. Nel merito, si osserva come il fatto che questi tre modelli si avvalgano della stessa fisica porti anche a dei volumi di plasma praticamente identici, con un raggio del plasma che si attesta tra i 9,1 e 9,6 metri.

Tirando le somme, posso già anticipare che questa fisica che è in sostanza quella di ITER, seppure migliorata, è sufficiente a realizzare dei reattori che, se non perfetti, sembrano comunque adeguati. Ciò si evince da alcuni dei parametri menzionati nel grafico, in primo luogo dalla corrente che circola nel plasma e che è molto alta (circa 30 milioni di mega ampère). Tale corrente in un reattore che funziona in modo continuo ha due origini.

Va considerato che in un qualsiasi plasma c'è una corrente autogenerata, dovuta al fatto che in un campo magnetico la particella elettrica che in esso si muove genera un campo elettrico che produce a sua volta una corrente che viene chiamata di «Bootstrap». Nel caso in esame meno del 50 per cento della corrente è autogenerata e per ottenere il complemento è necessario ricorrere ai famosi metodi di riscaldamento addizionale. La potenza che pertanto deve essere iniettata nel plasma è pari a 250 MWe, il che, in termini di rendimento e di efficienza del sistema di riscaldamento in un'ipotesi del 50-60 per cento, significa che occorrono circa 500 MWe.

Questi dati danno conto della necessità di dotarsi di reattori molto grandi per produrre energia sufficiente e al contempo rimanere economicamente interessanti malgrado la quantità di energia ricircolata, anche se ovviamente in futuro l'obiettivo sarà quello di realizzare reattori di seconda generazione in grado di ridurre la quantità di energia ricircolata. Quanto appena osservato si evince del resto dalla *slide* al vostro esame, ove potete notare come il modello C, che ha una base fisica nettamente migliore, possa ottenere una potenza erogata dell'ordine di 1,5 GWe, pur avendo una corrente di plasma di 20 e non di 30 mega ampère, come risulta invece per gli altri modelli considerati, e una potenza iniettata nel plasma pari a meno della metà. Ciò è dovuto al fatto che la frazione di energia autogenerata è più importante e che l'intensità totale, essendo più bassa, permette di ridurre notevolmente il riscaldamento addizionale.

Il modello D rappresenta un po' un sogno, dal momento che si ipotizza di pervenire alla realizzazione di reattori delle dimensioni di ITER,

ma con una potenza di fusione almeno 5 volte superiore ai 500 MWe di ITER e capaci di erogare 1,5 GWe.

Per quanto riguarda l'isola nucleare, è opportuno sottolineare prima di tutto che per ragioni ambientali diventa fondamentale per questi reattori individuare un materiale che produca poche scorie. Come è noto la fusione ha da sempre la pretesa di poter produrre energia pulita, laddove a mio avviso sarebbe più corretto parlare di energia «relativamente pulita». Infatti, pur non presentando gli stessi problemi di smaltimento delle scorie da combustibili di fissione, va tuttavia considerato che la reazione di fusione produce neutroni ad alta energia che bombardano la struttura, dando luogo così ad un processo da cui derivano comunque delle scorie. La grande differenza nel caso della fusione è che dopo alcuni anni (tipicamente indichiamo il valore di cento anni) si ritiene che la maggior parte delle scorie possano essere già riciclate o stoccate in superficie. Appare quindi chiaro che la problematica posta dalla fusione differisce nettamente da quella posta dalla fissione, purtuttavia risulta altrettanto evidente come anche in questo caso il problema delle scorie vada seriamente affrontato. La ricerca sviluppata in tale direzione ha portato con enorme sforzo all'individuazione di un materiale strutturale, chiamato «Eurofer». Si tratta di un acciaio ferritico martensitico che dal punto di vista della temperatura è limitato ai suoi due estremi. Va infatti considerato che a temperature alte, ovvero oltre i 550 gradi, questo materiale comincia ad avere delle perdite di caratteristiche meccaniche inaccettabili, ciò determina la necessità di limitare la temperatura massima del fluido di raffreddamento a 500 gradi, il che costituisce quindi un limite per l'utilizzo di questo materiale con elio. Quest'ultimo è un fluido di raffreddamento molto interessante quando opera sugli 800-900 gradi (come nei concetti di generazione 4 della fissione), laddove a 500 gradi, benché abbia delle prestazioni accettabili, risulta sicuramente meno efficiente dal punto di vista termodinamico.

A livello basso, invece, c'è un problema di fragilizzazione di questo materiale che intorno ai 300 gradi diventa come il vetro, dal momento che perde progressivamente tutta la sua flessibilità. Il vetro è del resto un materiale difficile da utilizzare, al contrario dell'acciaio che, data la sua flessibilità, garantisce un grado di sicurezza molto alto.

A livello tecnologico, il modello C (a differenza dei modelli A e B che usano rispettivamente solo acqua e solo elio) utilizza un miscuglio di elio e litio-piombo che permette di raggiungere temperature più alte. Il litio-piombo in questo modello esce a 700 gradi e quindi permette di avere un rendimento termodinamico migliore per la conversione di energia. È anche opportuno sottolineare che nell'ambito del reattore si genera trizio e dunque è necessario disporre di un materiale adatto (utilizziamo o dei materiali ceramici solidi o del litio-piombo). Una caratteristica del raffreddamento ad elio è che richiede requisiti molto particolari in quello che noi chiamiamo il divertore, ovvero in uno dei due componenti interni del reattore che è poi una sorta di tubo di scappamento. La reazione di fusione, quando si bruciano il deuterio e il trizio, produce dell'elio che

deve essere evacuato e che quindi transita all'esterno del plasma per poi andare a «picchiare», con livelli energetici molto alti, sul divertore. Quest'ultimo, quindi, deve poter sopportare dei carichi termici altissimi, pari – tanto per darne un'idea di grandezza – a 5-6 volte quelli che si producono sulle tegole dello *Space Shuttle* in fase di rientro nell'atmosfera. Vi è pertanto la necessità di individuare dei materiali idonei; si sta pensando ad esempio di utilizzare delle leghe di tungsteno, un materiale meraviglioso che però oggi non è impiegato in nessun campo come materiale strutturale, e sul cui utilizzo debbono perciò essere sviluppati opportuni programmi di ricerca. Peraltro, è anche su questo aspetto che si incentra la differenza tra i modelli A, raffreddati ad acqua, che pure presentano dei problemi, e quelli B, raffreddati ad elio che, come già sottolineato, è un materiale dotato di un requisito supplementare dal punto di vista tecnologico, che però dà luogo anche ad un rischio supplementare che va tenuto presente e che è oggetto di studio.

Nell'ambito delle nostre analisi abbiamo poi cercato anche di valutare la effettiva conformità ai requisiti posti di questi modelli di reattore, addivenendo in proposito anche a delle conclusioni. Ad esempio, dal punto di vista della sicurezza possiamo dichiararci soddisfatti in primo luogo perché in tutti questi modelli di reattore la mancanza totale di raffreddamento non conduce a nessuna fusione di componenti strutturali – mi riferisco al famoso *loss of cooling accident* (LOCA) – anche in assenza di sistemi di sicurezza attivi. Detto più semplicemente: qualsiasi cosa succeda, si può chiudere la porta e andarsene di corsa perché il reattore non fonde; né si rendono necessarie evacuazioni delle popolazioni residenti, posto che è possibile concepire le diverse barriere di confinamento in modo che la radioattività presente nel trizio non venga mai emessa in maniera incontrollata ed in termini tali da richiedere piani di evacuazione.

Inoltre, come già segnalato, nessuna scoria radioattiva prodotta da questi reattori richiederà la predisposizione di discariche geologiche, ovvero lo stoccaggio a lungo termine di componenti con produzione di calore interna che hanno l'esigenza di trattamenti particolarmente delicati.

Per quanto riguarda l'analisi dei costi, abbiamo cercato di fare del nostro meglio, tenuto conto della difficoltà di stimare oggi quale sarà il costo dell'energia tra 50 anni. In base ai nostri studi, per il modello A abbiamo calcolato un costo di generazione di energia elettrica che va dai 5 a 9 centesimi di euro per kWh, mentre per il modello D il costo è tra i 3 ed i 5 centesimi di euro per kWh. L'imprecisione nella determinazione del costo è in questo caso legata non solo alla diversità dei modelli di reattore cui si fa riferimento: è infatti evidente che l'energia prodotta dal primo reattore sarà sempre più cara di quella prodotta dal decimo della serie e la forchetta che abbiamo indicato traduce in sostanza proprio quello che si ricaverà realizzando diversi reattori di una stessa famiglia. La nostra stima si può comparare con i costi delle energie che cercano di essere rispettose dell'ambiente, come l'eolica e da biomassa, basandoci sui dati di una fonte completamente indipendente, la *Shell Renewables*, e la nostra

conclusione è che tali costi siano paragonabili pur con tutte le incertezze del caso.

Tengo anche a ricordare che il PPCS è stato avviato non solo per sviluppare dei reattori, ma anche per cercare di identificare le priorità a lungo termine del programma di ricerca europeo sulle quali non mi soffermerò, dal momento che credo siano state già qui rappresentate dal dottor Quintana Trias nel corso della sua audizione. Mi limiterò quindi solo a ricordare che le nostre analisi hanno confermato la necessità di costruire una macchina come ITER al fine di validare la base fisica. Altrettanto prioritario è continuare a lavorare approfonditamente sui materiali (al riguardo ricordo la macchina IFMIF per validare i materiali in ambiente nucleare tipico di fusione), come pure sugli aspetti tecnologici relativi ad esempio ai sistemi di riscaldamento addizionale e ad altri componenti, quali i sistemi di manutenzione a distanza su cui mi riservo brevemente di intervenire nel prosieguo della mia presentazione.

Sperando con queste ultime notazioni di avervi fornito per lo meno un'idea sia del PPCS che del reattore, vorrei ora soffermarmi su DEMO. Nel merito, ritengo in primo luogo fondamentale chiarire che DEMO non è il primo reattore, posto che quest'ultimo verrà realizzato in un momento successivo. DEMO avrà chiaramente la dimensione di un reattore e potrà, volendo, produrre energia, purtuttavia esso costituisce l'ultimo passo prima del reattore vero e proprio che verrà costruito e finanziato da un operatore privato, laddove DEMO usufruirà principalmente di fondi pubblici.

In tema di obiettivi qualcuno superficialmente potrebbe affermare che lo scopo di DEMO sia quello di essere una specie di reattore anche se meno affidabile; a ben guardare, però, nonostante in questa affermazione ci sia comunque del vero, l'obiettivo di DEMO è in realtà completamente diverso ed è dimostrare la fattibilità tecnologica e economica della fusione, laddove il primo reattore sarà chiamato a provare la sua capacità di produrre elettricità in modo competitivo. In quest'ottica si può già anticipare che DEMO sarà di dimensioni contenute al fine di limitarne i costi di costruzione e la sua potenza, a seconda delle configurazioni, si aggirerà intorno a 1-2 GW, mentre il reattore per poter diventare economicamente interessante dovrà contare su una potenza tra i 4 ed i 5 GW. Quindi, seppure quando si parla di 1 GW termico ci si riferisca già a dimensioni da reattore, il primo reattore a fusione dovrà avere dimensioni quattro o cinque volte più grandi di DEMO.

Forse risulterà deludente per le Commissioni sapere che non esiste un concetto di riferimento per DEMO e questo per la stessa ragione per cui non esiste un concetto di reattore; o meglio, esistono concetti possibili di reattore per cui, a seconda di quello selezionato e dell'obiettivo che ci si prefigge, si possono implicitamente fare delle ipotesi sulla base delle quali poi sviluppare un concetto DEMO ottimale; ciò premesso, oggi non siamo in grado di dire come sarà DEMO. Ciò non significa che abbiamo rinunciato a questa possibilità, ma solo che abbiamo iniziato a guardare ai vari

modelli di reattori a fusione, in particolare al PPCS con estrapolazioni limitate, per valutare come pervenire all'obiettivo.

L'analisi critica dei modelli PPCS ci ha permesso di individuare gli elementi chiave, determinanti per la progettazione di DEMO, e di identificare al riguardo sostanzialmente tre punti critici. Il primo è rappresentato dai sistemi di riscaldamento addizionale, ed in tal senso ho già avuto modo di sottolineare la necessità di dotarsi di sistemi di riscaldamento efficaci, considerate anche le potenze cui facciamo riferimento.

Il secondo elemento è dato dalla necessità di sviluppare la fisica del reattore e di DEMO.

Il terzo elemento attiene alla parte tecnologica e il suo obiettivo si può riassumere nella necessità che il progetto DEMO funzioni con una disponibilità alta, per essa intendendo, da un lato, una grande affidabilità dei componenti e, dall'altro, dei tempi contenuti di manutenzione nei casi di malfunzionamento della macchina.

Cercherò ora di entrare nel dettaglio di questi 3 elementi. Per quanto riguarda il riscaldamento addizionale, reputiamo forse un po' ottimistiche le ipotesi relative alle efficienze nei nostri studi sul reattore. Tengo a precisare che, se in questo caso abbiamo mostrato un eccessivo ottimismo, risultano invece esageratamente pessimiste le nostre ipotesi in materia di efficienza termodinamica e, se non si può affermare che un fattore compensi l'altro, non bisogna immaginare che abbiamo avanzato solo ipotesi ottimistiche.

Oggi, sulla base di un'analisi effettuata a posteriori e che tiene conto degli ultimi sviluppi della fisica, ipotizziamo che DEMO possa erogare 1 GWe, avendo un raggio di plasma tra 7,5 e 8 metri in caso di funzionamento continuo, e tra i 9 e i 10 metri in caso di funzionamento quasi continuo, ossia puramente induttivo. Questo, pertanto, senza voler entrare nel dettaglio, è un campo dove è già possibile immaginare delle differenze tra un reattore e DEMO, posto che quest'ultimo potrebbe funzionare sia in continuo – per l'appunto come un reattore – oppure quasi di continuo, ovvero con piccole pause durante il giorno, il che permetterebbe di conseguire tutti gli obiettivi tecnologici di qualifica dei componenti (eventualmente anche di erogare elettricità), ma non rappresenterebbe certo la situazione ottimale dal punto di vista del reattore.

In passato quello che ho prima definito «funzionamento quasi continuo» veniva chiamato «funzionamento pulsato». Per «funzionamento quasi continuo» intendiamo una scarica che duri 8 ore e un tempo per ricaricare il solenoide dell'ordine di 10-15 minuti, il che significa che su 24 ore abbiamo periodi «*off*» che hanno una durata di circa mezz'ora. Essendo questi i tempi di ricarica del sistema, mi sembra pertanto più opportuno parlare di un funzionamento quasi continuo piuttosto che pulsato.

Nel campo del riscaldamento addizionale diventa pertanto essenziale migliorare le efficienze e, allo stesso tempo, limitare il numero dei sistemi di riscaldamento addizionale per DEMO e per il reattore.

Oggi esistono quattro modalità completamente diverse per iniettare potenza in un plasma, ognuna delle quali è specializzata in funzioni di-

verse e farle coesistere all'interno di un reattore può incidere sulla sua efficienza; l'obiettivo pertanto è che DEMO possa fare ricorso solo a due modalità. Non so si tratti di un obiettivo raggiungibile o quali siano le modalità da privilegiare, ma è comunque quello su cui chiedo di lavorare agli specialisti dei sistemi di riscaldamento.

Per quanto riguarda gli obiettivi della fisica, non essendo un fisico semplificherò molto la loro definizione e, piuttosto che fare riferimento a formule molto estese e incomprensibili, li riassumerò nel seguente modo. Tenuto conto che il plasma porta una corrente di plasma costituita per una parte da una frazione di *bootstrap*, dunque dalla corrente autogenerata e, per l'altra, dalla corrente che deve essere iniettata con sistemi di riscaldamento addizionale o più esattamente di «*current drive*», sistemi di mantenimento della corrente, occorre far sì in primo luogo che il parametro relativo al tempo di confinamento sia adeguato al reattore, e quindi pari all'incirca a quattro secondi (secondo la base fisica). A tale obiettivo si aggiunge inoltre la necessità sia di limitare la corrente totale circolante nel plasma, sia di massimizzare la frazione di corrente autogenerata.

Non so come questo obiettivo potrà essere conseguito, penso tuttavia che oltre alla sperimentazione di una macchina come ITER abbiamo comunque davanti un periodo di trent'anni di ricerca nel campo della fisica e spetta per l'appunto proprio ai fisici pervenire ad una situazione accettabile dal punto di vista sistemistico per un reattore.

Per quanto riguarda la parte ingegneristica, è possibile riassumere i requisiti necessari per tutti i componenti parlando di disponibilità. L'obiettivo principale di DEMO è la qualifica dei componenti dell'isola nucleare e quindi la disponibilità di DEMO è un parametro essenziale. È necessario disporre di una certa potenza, di un certo tempo e di un certo numero di neutroni. La combinazione di questi elementi viene definita *fluenza* e si misura in dpa (*displacement per atom*) in base a cui si stima l'effetto del bombardamento neutronico sulla struttura atomica di una struttura.

Volendo fornire delle cifre, puntiamo ad ottenere un materiale per gli interni che possa sopravvivere fino a 150 dpa ed il nostro obiettivo è pervenire ad un livello di qualificazione dei componenti dei materiali pari a 50 dpa per iniziare la progettazione del primo reattore, e a componenti qualificati a livello 100 dpa per iniziarne la costruzione. Ciò, se si assume una potenza neutronica dell'ordine di 2 MW per metro quadrato e una disponibilità di 50 per cento in DEMO, ossia 12 ore al giorno per sette giorni a settimana, rappresenterebbe un salto tecnologico enorme, soprattutto se si effettua una comparazione con le macchine attuali la cui disponibilità è esattamente pari a zero, visto che alternano operazioni di pochi secondi a pause di ore. Stando a queste ipotesi, per raggiungere questi obiettivi occorreranno circa sei anni, senza tener conto della fase iniziale di *commissioning* che richiederà sicuramente un ulteriore certo numero di anni. Laddove si consideri invece una disponibilità nell'ordine medio del 33 per cento, che già rappresenta una grande sfida, saranno necessari otto anni per conseguire i 50 dpa prima di iniziare la progettazione del reattore. Ciò permette di valutare prima di tutto il *challenge* tecnologico di

DEMO, perché se il suo obiettivo è quello menzionato, allora è evidente che DEMO sarà chiamato essenzialmente ed esclusivamente a concentrarsi e non vi sarà tempo per occuparsi di altro, in particolare della fisica. Ciò significa che la fisica dovrà essere validata e verificata nell'ambito di ITER e che eventuali ottimizzazioni in questo campo dovranno essere sperimentate mediante altre macchine e non con DEMO. Quest'ultimo dovrà quindi concentrarsi sulle funzioni anzidette ed in tal senso credo che le semplici considerazioni da me svolte in materia di disponibilità sottolineino con evidenza come qualsiasi ulteriore obiettivo del DEMO porterebbe unicamente ad un ritardo nello sviluppo della fusione.

Per descrivere l'affidabilità credo sia poi utile fare riferimento alla semplice formula che viene riportata nella *slide* al vostro esame, dove appare al numeratore il tempo di funzionamento della macchina e al denominatore il tempo necessario per le riparazioni e per qualsiasi altro intervento. Riguardo al tempo di manutenzione, sottolineiamo che se le strutture interne sono attivate tutte le operazioni di manutenzione debbono essere effettuate a distanza. Questo rappresenta un *challenge* piuttosto unico, che esula anche dall'immaginario dei film di fantascienza che siamo abituati a vedere. Questo non vale tanto per le operazioni singole, dove si è addivenuti a dei risultati davvero eccezionali, quanto nell'intero processo di manutenzione di un reattore solo ed esclusivamente a distanza, scongiurando quindi qualsiasi intervento umano, anche in caso di emergenza.

Questa difficoltà si presenta anche nel caso di ITER che necessita anch'esso di una manutenzione remota, a distanza, e questo benché la sua fluenza sia assai più limitata rispetto a quella di DEMO. Sfortunatamente, però, il sistema di manutenzione individuato, pur rispondendo perfettamente alle esigenze di ITER, non è adatto al reattore perché comporta tempi troppo lunghi e dunque non conviene in termini di disponibilità. Ne consegue che un ulteriore obiettivo di DEMO sarà proprio quello di validare il concetto di manutenzione per il reattore.

Ciò premesso, il lavoro che verrà svolto per realizzare la manutenzione remota o a distanza in ITER anche se con strumentazioni diverse costituirà comunque un'utile esperienza e una essenziale sorgente di informazioni.

Per quanto riguarda la disponibilità vi invito ad osservare il grafico riportato nella *slide* proiettata: in esso la linea blu, quella che ha una forma che assomiglia ad una vasca da bagno, rappresenta il totale dei guasti di qualsiasi componente (*failure*). Quella verde in basso si riferisce ai guasti aleatori, costanti durante tutta la vita del componente, mentre quella gialla, come facilmente intuibile, segnala i guasti dovuti all'usura (come nel caso degli pneumatici che dopo un certo numero di chilometri debbono essere sostituiti). La linea rossa – forse la meno percepita – è quella che definisce la «mortalità infantile» e che segnala i guasti che sempre si registrano a livello di primo componente. Aggiungo anche che il tasso di mortalità infantile aumenta quanto più complessi sono i componenti o la tecnologia utilizzati.

Ora, considerata la complessità della fusione, si intuisce che la macchina DEMO, come il primo reattore, avrà un elevato tasso di mortalità infantile dei diversi componenti. Tale dato, evidentemente, oltre ad una fase di *commissioning* abbastanza lunga, rende a mio avviso sin d'ora necessario anche un cambiamento di mentalità nel mondo della fusione in base al quale sia per DEMO che per il reattore la scelta dei concetti dei componenti dovrà essenzialmente tenere conto di questo aspetto, non limitandosi quindi, come invece facciamo oggi, a massimizzare le capacità, ma provando a semplificare il progetto del componente. Del resto, nel mondo della scienza si cerca di fare sempre il meglio possibile, anche se talvolta i *marchingegni* utilizzati risultano fin troppo complicati.

Mi sono soffermato su questi aspetti anche per dimostrare che esistono già concetti DEMO, tra questi vi è quello mostrato dalla *slide* al vostro esame che prende in esame un possibile DEMO basato sulla tecnologia del modello AB del PPCS, che prevede raffreddamento ad elio, un generatore di trizio che utilizza litio-piombo, magneti superconduttori che si avvalgono della tecnologia di ITER (dunque a bassa temperatura) e una potenza di fusione un pochino superiore a quella che personalmente riterrerei opportuna (il che sta a dimostrare che non sempre le mie opinioni vengono condivise). La macchina presa in considerazione nella *slide*, come già segnalato, prevede il raffreddamento ad elio e questo mi porta a soffermarmi nuovamente sulla questione del bilancio energetico a partire dai dati riportati nella tabella in esame, relativi alla potenza di riscaldamento addizionale, corrispondente a 192 MW, e alla potenza per pompare l'elio, equivalente a 194 MW. Questa macchina ha un fattore Q pari a 12,5, mentre il dato relativo al rapporto tra la potenza di fusione totale e quella ricircolata corrisponde alla metà (ossia pari circa a 6). Nel caso dell'elio, dunque, la potenza di pompaggio riveste sempre una grande importanza, mentre questo non è più vero se si utilizza il raffreddamento ad acqua, considerato che la potenza necessaria per farla circolare è cinque o dieci volte inferiore a quella di cui necessita l'elio. Pertanto, si conferma l'esigenza, a livello di reattore, di tenere conto del secondo rapporto.

Passando alle conclusioni, va innanzi tutto sottolineato che il progetto DEMO potrà essere finalizzato appena e solo quando ITER avrà dimostrato la fisica del reattore. La realizzazione di DEMO verrà ovviamente preceduta dallo sviluppo di numerosi modelli. In parallelo con ITER è necessario non solo continuare, ma ampliare la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie. Infatti, se è vero che siamo ancora una comunità dominata dal mondo della fisica e che la dimostrazione della fisica del reattore è l'obiettivo primario di ITER, comincia però ad emergere con chiarezza anche l'importanza di sviluppare tecnologie in particolare per quanto riguarda i materiali, i sistemi di mantenimento della corrente e la manutenzione a distanza.

Spero quindi di aver chiarito che l'obiettivo principale di DEMO – che, tengo a ribadirlo, non è un reattore, anche se ne avrà molte caratteristiche, in particolare per quanto riguarda i livelli di potenza – è la qualifica dei componenti del reattore, oltre a quello di fornire indicazioni sulla

fattibilità economica della fusione termonucleare controllata e tutte le informazioni utili a permettere di decidere sulla eventuale costruzione di questi reattori.

Vi ringrazio per la vostra attenzione e resto a disposizione per ogni quesito gli onorevoli senatori vorranno rivolgermi.

PRESIDENTE. Ringrazio il dottor Maisonnier per la sua articolata esposizione e per la complessa presentazione consegnataci, inerente un progetto europeo di grande rilevanza, intrinsecamente non facile da valutare per chi come noi non ha competenze tecniche specifiche.

Prima di aprire il dibattito, vorrei chiederle alcune precisazioni, in primo luogo per quanto attiene alla formula utilizzata nella sua presentazione a proposito della potenza di fusione che viene definita come la somma della potenza alfa più la potenza di riscaldamento addizionale, ma che non include la potenza dei neutroni, come invece avrei immaginato anche in relazione a quanto da lei dichiarato.

MAISONNIER. Ho considerato la potenza utilizzata per riscaldare il plasma...

PRESIDENTE. Questa è, quindi, la potenza che confluisce nel plasma?

MAISONNIER. Sì. Quando si calcola il bilancio energetico si valuta la potenza in entrata e quella in uscita ed è su quest'ultima che mi sono soffermato.

PRESIDENTE. Lei si riferisce quindi alla potenza che confluisce nel plasma, posto che la potenza di fusione è cinque volte più elevata?

MAISONNIER. Infatti.

PRESIDENTE. Ho rilevato che nel corso di alcune audizioni svolte nell'ambito della presente indagine conoscitiva, il parametro Q, anche per quanto riguarda ITER, è stato definito diversamente da come da lei illustrato, ovvero come il rapporto tra la potenza complessiva generata nella fusione (alfa più neutroni), diviso la potenza artificiale iniettata per riscaldare il plasma, ove però quest'ultima viene misurata nel momento in cui entra nel plasma. Se possibile, vorrei un chiarimento anche a questo riguardo.

MAISONNIER. Come già sottolineato, l'energia può essere presa in considerazione sia in entrata che in uscita. In termini di bilancio energetico si può in un certo senso anche affermare che la potenza di riscaldamento addizionale sia la stessa dei neutroni.

PRESIDENTE. Questo però in linea generale potrebbe non essere vero; se le cose stessero così allora la potenza di fusione sarebbe cinque volte più elevata delle alfa.

MAISONNIER. Infatti, la potenza fusione è cinque volte quella delle alfa e ciò è dato dalla relazione summenzionata.

PRESIDENTE. Se ciò fosse vero, però, la potenza di riscaldamento addizionale sarebbe enormemente prevalente.

MAISONNIER. Concordo con le sue osservazioni, mi rendo conto di aver utilizzato una semplificazione forse eccessiva.

PRESIDENTE. Mi permetta di rivolgerle un'ulteriore richiesta di precisazione. Con riferimento alla *slide* intitolata «Un DEMO possibile» (riportata a pagina 27 del documento da lei illustrato e depositato agli atti della Commissione) vorrei che ci chiarisse in primo luogo nel grafico che rappresenta la sezione della struttura dell'anello quale è la sezione della prima parete che separa il plasma e se si tratta di una parete molto sottile.

MAISONNIER. Questa linea è la famosa «separatrice» e nel grafico al vostro esame è quella tratteggiata. Il materiale è attraversato da un flusso mediamente di 1 MW per metro quadrato, mentre nel divertore, nelle zone più cariche, secondo i modelli abbiamo valori tra 10 e 15, in questo specifico caso circa 9 MW; Quanto alla prima parete essa è la parte frontale del componente *blanket*.

PRESIDENTE. Sempre riguardo a questo stesso grafico, che considero di grande interesse, vorrei sapere dove risulta essere presente il piombo-litio.

MAISONNIER. Il piombo-litio in questo caso è l'elemento per la produzione di trizio nel *blanket*.

PRESIDENTE. Quell'elemento è in grado di fermare neutroni da 14 milioni di elettron volt (MeV)?

MAISONNIER. Prima di tutto, qui l'elemento piombo-litio è quasi *stagnant*.

PRESIDENTE. Noto che la temperatura è elevata.

MAISONNIER. Esatto. Il raffreddamento è effettuato con elio che è per l'appunto utilizzato per raffreddare le strutture e il litio-piombo. I neutroni sono fermati dall'insieme del *blanket* e del *vacuum vessel*, ovvero della camera da vuoto il cui spessore, come si evince dal grafico, è di una certa rilevanza.

Quanto al *blanket*, esso ha anche funzione di primo schermo, se lo si vuole chiamare così, sapendo che l'effetto di schermaggio neutronico è più efficace nella parte del *vacuum vessel*, perché è stato ottimizzato utilizzando il 60 per cento di acciaio e il 40 per cento di acqua. Tengo a precisare che sebbene il piombo-litio di per sé non abbia una grossa efficacia nel fermare i neutroni, purtuttavia fornisce il suo contributo in tale direzione. Quanto poi al problema dello schermaggio nucleare neutronico, abbiamo l'esigenza di dimensionarlo tenendo conto del limite di vita dell'isolante elettrico del magnete. Per ciò che attiene ai requisiti dimensionanti (a parte gli elementi strutturali), dal momento che vi è la necessità nella parte *blanket* di produrre trizio e che si è quindi in presenza di una certa quantità di materiale fertile, occorre prevedere determinati spessori proprio al fine di ottenere un'attenuazione neutronica; sempre allo scopo di ottenere una attenuazione neutronica soddisfacente, vi è spesso l'esigenza di dimensionare anche il *vacuum vessel*.

PRESIDENTE. Quale forma ha e di quale materiale è composto il *vacuum vessel*?

MAISONNIER. Ha la forma di una V. Per quanto riguarda il materiale, per DEMO è stato ipotizzato l'utilizzo nel *blanket* di acciaio AISI 316, mentre per il reattore si pensa di avvalersi di materiali migliori. Nel caso di DEMO il *vacuum vessel* è raffreddato ad acqua. Ci stiamo riferendo ad una struttura di una certa rilevanza con un raggio di 7,5 metri.

PRESIDENTE. Un ulteriore chiarimento. La reazione neutronica che produce il trizio dà luogo ad un neutrone. Per riuscire quindi a recuperare il 100 per cento del trizio che si perde, occorre catturare tutti i neutroni?

MAISONNIER. Lei ha osservato giustamente che una reazione di fusione produce 1 neutrone e che vi è bisogno di 1 neutrone per produrre il trizio; quindi, premessa l'impossibilità di recuperare il 100 per cento del trizio, vi è la necessità di disporre nel *blanket* di un moltiplicatore di neutroni e ciò rappresenta un'ulteriore complicazione. Da questo punto di vista va segnalato che uno dei motivi per cui viene utilizzato il piombo è anche perché esso ha un effetto moltiplicatore di neutroni. Nel caso vengano invece utilizzati materiali fertilizzati come le ceramiche, per ottenere tale effetto moltiplicatore si utilizzano palline di berillio. La questione si complica nel caso del reattore perché tenere conto di questa problematica comporta ulteriori difficoltà nella definizione del componente *blanket*. Quest'ultimo, svolge del resto molteplici funzioni: infatti, oltre ad essere chiamato a resistere al flusso termico a livello della prima parete ed al carico neutronico sul piano strutturale, contribuisce all'attenuazione neutronica per proteggere il magnete e produce trizio, il che richiede non solo un materiale fertile, ma anche la presenza di un moltiplicatore dei neutroni. Tutto ciò fa del *blanket* un componente alquanto complesso.

PRESIDENTE. Un ultimo chiarimento sempre in riferimento al grafico prima menzionato. Vorrei sapere se la potenza di 192 MW di riscaldamento addizionale corrisponde a quella misurata all'interno del plasma.

MAISONNIER. Iniettata nel plasma e quindi misurata quando entra in esso.

PRESIDENTE. Avendo un fattore di moltiplicazione di 12,5 si riesce ad arrivare ai 2,4 GW; ciò premesso, in riferimento alla possibilità di produrre una potenza di 192 MW artificiali all'interno del plasma, mi permetto di osservare che i rendimenti da lei segnalati, dell'ordine del 50 per cento, risultano eccessivamente elevati. Ritengo che per produrre la suddetta potenza con qualunque dei quattro sistemi da lei citati, i rendimenti ipotizzabili non superino il 20-25 per cento. Se il rendimento è del 25 per cento, lei deve moltiplicare per 4 e quindi ha una potenza elettrica...

MAISONNIER. Sì.

PRESIDENTE. Inoltre, i 2,4 GW sono termici, con un rendimento che non credo sia superiore al 30 per cento.

MAISONNIER. Abbiamo migliorato il rendimento che quindi si attesta tra il 30 e il 40 per cento.

PRESIDENTE. Il 40 per cento mi sembra una percentuale un po' troppo elevata.

MAISONNIER. Stiamo parlando però di elio e non di acqua.

PRESIDENTE. L'elio però non viene utilizzato fino in fondo.

MAISONNIER. Otteniamo tali percentuali sfruttando al meglio l'elio che raffredda il divertore. In ogni caso, va detto che, stando ai dati attuali le sue osservazioni, Presidente, sono perfettamente condivisibili; quelli che ho però utilizzato nella mia presentazione sono i dati corrispondenti alle ipotesi formulate dagli specialisti di questi sistemi, sulla base delle quali penso sia ragionevole, con un adeguato programma di sviluppo, immaginare di poter ottenere nell'ambito di DEMO rendimenti tra il 50 e il 60 per cento.

Nel caso del PPCS, invece, come già evidenziato, avevamo ipotizzato dei modelli con un rendimento del 60 per cento che successivamente abbiamo ridimensionato portandoli al 50 per cento.

L'unico aspetto che al riguardo sento di dover ribadire è la necessità di compiere uno sforzo molto importante ai fini dello sviluppo di questi sistemi.

DE FEO (*PdL*). Signor Presidente, se devo essere sincera nell'osservare i lunghi tempi di realizzazione del progetto che datano addirittura 2037 ho pensato, in un primo momento, che tutto questo in realtà riguardasse il futuro dei nostri figli se non addirittura dei nostri nipoti; purtroppo, proprio per garantire quel futuro, abbiamo il dovere di ascoltare e di cercare di capire quanto ci viene sottoposto.

In quest'ottica, e considerati i lunghissimi tempi previsti, vorrei conoscere la ragione degli elevati costi del progetto rispetto all'impiego delle altre fonti di energia, anche quelle attualmente esistenti quali il petrolio.

MAISONNIER. Come già sottolineato, le nostre stime dei costi di produzione, benché siano frutto di analisi improntate alla massima serietà, hanno un valore relativo, viste le incertezze, e indicano un ordine di grandezza.

Vorrei innanzi tutto precisare che le stime sono addirittura troppo basse, tenuto conto del fatto che nella fusione ciò che costa molto è l'impianto; di contro, se si assume per il combustibile una spesa pari a zero non si sbaglia di molto. Per le odierne centrali di cogenerazione a gas, che hanno un'efficienza termodinamica fantastica, pari al 60 per cento, con tempi di costruzione di due anni, e dunque un investimento pari a zero, tutto il costo della produzione dell'energia è rappresentato dal combustibile. Nel caso del nostro reattore si è invece in presenza di un investimento importante con un costo del combustibile veramente irrisorio, pari quasi a zero, visto che il deuterio e il litio si trovano nella crosta terrestre e nell'acqua del mare.

Quanto alla stima esatta del costo dell'impianto, una volta considerata la spesa per ITER, abbiamo cercato di ricalibrare i nostri conti su questi valori, addivenendo così alle ipotesi che vi ho illustrato. Tali ipotesi possono anche essere passibili di errore, per quanto ci riguarda posso dire comunque che ci siamo limitati a fornire un ordine di grandezza, giacché al momento non si può fare altro.

Per quanto riguarda i costi delle altre fonti di energia segnalati, abbiamo ritenuto opportuno basarci su una fonte completamente indipendente, ma anche in questo caso vi sono grandi margini di incertezza.

A titolo di esempio, a proposito del costo del petrolio mi permetto di ricordare le previsioni più autorevoli, ovvero quelle pubblicate dall'*International Energy Agency* uno o due anni fa, in base alle quali il costo attuale del petrolio avrebbe dovuto aggirarsi intorno ai 70 dollari al barile ed essere in lenta crescita; come è noto, invece, tre mesi fa eravamo intorno ai 150 dollari al barile e adesso si parla di ritornare a 80. Viste queste oscillazioni, tra 40 anni quale potrà mai essere il prezzo di un barile di petrolio? Per quanto mi riguarda anche tra 1 e 1.000 dollari!

VETRELLA (*PdL*). Signor Presidente, ringrazio il dottor Maisonnier per la sua presentazione sicuramente molto interessante.

Vorrei in primo luogo soffermarmi sugli aspetti tecnico-scientifici del programma, che ci è stato illustrato in modo sintetico. Nel corso di tale

illustrazione si è parlato della strategia europea per lo sviluppo della fusione, ci è stato spiegato cosa è DEMO, ed è stata affrontata la questione della dimostrazione della fattibilità scientifica, tecnologica ed economica della fusione. Trascurando la parte economica, cui sono meno interessato, desidero ora focalizzare l'attenzione su quella scientifica e tecnologica rispetto alla quale vorrei porre un breve quesito sulla base della cui risposta potrò poi proseguire il mio intervento. Corrisponde al vero l'affermazione secondo cui la parte scientifica sarebbe tutta rappresentata da ITER e quella tecnologica da DEMO? Per esser più chiari, è previsto che DEMO partirà con la dimostrazione tecnologica solo una volta che ITER avrà effettuato quella scientifica, o tra le due attività esistono sovrapposizioni che, peraltro, dal punto di vista del *path* temporale sembrerebbero sussistere?

MAISONNIER. Quanto affermato dal senatore Vetrella corrisponde al vero, ma forse necessita di essere completato, nel senso che DEMO ha effettivamente l'obiettivo da lei segnalato sul piano tecnologico, ciò significa che deve essere stabilita in precedenza la fisica da utilizzare in DEMO e che, se funzionerà in tale ambito, potrà essere utilizzata anche in un reattore. Questo però non impedisce di sviluppare, parallelamente a DEMO, ulteriori ricerche nel campo della fisica al fine di individuare eventuali alternative; mi riferisco in particolare ai cosiddetti concetti avanzati (ibridi, eccetera). Quello che tuttavia mi sembra importante sottolineare è che l'obiettivo di ITER, per quanto riguarda ad esempio il famoso modello *ELMy H-Mode*, pur se con qualche miglioria è per noi sufficiente a far operare DEMO in modo soddisfacente. Per quanto attiene poi ad eventuali ulteriori sviluppi, vi è ovviamente la possibilità di sperimentare anche altre macchine; tanto per fare un esempio, la macchina ITER nel corso della fase 2 potrebbe darsi degli obiettivi oggi poco definiti e che quindi andrebbero focalizzati su scenari di fisica più avanzata.

VETRELLA (PdL). Desidero porre un'ulteriore questione a partire sia da questo suo chiarimento che dal piano temporale riportato nel grafico contenuto nella presentazione. In quest'ultimo si rileva che la costruzione di ITER, che decorre dall'inizio del 2009, si pone in parallelo – all'incirca alla fine del 2009 – con le operazioni denominate DEMO CDA. La mia domanda riguarderà pertanto uno degli aspetti fondamentali di questo programma, ovvero il plasma, che ad oggi rappresenta il mezzo, l'elemento più significativo dal punto di vista delle nostre conoscenze scientifiche, anche al di là di tutta una serie di problematiche tecnologiche che possiamo anche trattare, e che lei, dottor Maisonnier, ha in parte affrontato, quali ad esempio la scaletta dei tempi necessari per la realizzazione di materiali di particolare importanza. Ciò premesso, vorrei però soffermarmi alle origini della questione e focalizzare l'attenzione sul plasma, chiedendole quindi un chiarimento sul processo che è stato attivato – com'è d'uso – per ottenere la certezza del consenso della comunità scientifica sul modello utilizzato nel progetto. In tal senso, la pregherei quindi di farmi

avere un elenco (eventualmente anche in un momento successivo), di enti scientifici internazionali che oggi certificano alla base il modello del plasma su cui stiamo impostando un investimento significativo in termini di mezzi, strumenti, uomini ed eventualmente anche tecnologie. Tralasciando il resto, il mio problema è capire su che cosa si fondi la validità di questo processo, così come del resto sempre accade nel mondo della scienza, tant'è che se lei si rivolge ad uno scienziato chiedendo se in base alle conoscenze attuali le leggi di Newton si possano ritenere ancora valide, la risposta, nonostante piccole percentuali di dubbio, sarà sicuramente affermativa, per cui tanto negli Stati Uniti, che in Francia come in Spagna troverà scienziati che convergeranno senz'altro su tale leggi.

Allo stato la mia limitatissima conoscenza in materia di plasma mi porta a dire che nel merito esiste una certa confusione. È un po' quello che avviene nella modellistica dell'atmosfera per cui mentre nella macro circolazione la comunità scientifica ormai conviene sui modelli esistenti, nella micro circolazione ognuno ha le proprie idee, ne è prova il fatto che alcuni scienziati hanno calcato a tal punto la mano sul problema del buco dell'ozono da far pensare che stessimo tutti per morire.

Vorrei quindi sapere da lei, consapevole delle responsabilità che ricopre a livello di Commissione europea, se la comunità scientifica esperta di plasma abbia certificato la validità del modello utilizzato nel progetto. Quale è il «vangelo» cui in proposito fa riferimento la comunità scientifica?

MAISONNIER. Al di là del «vangelo» utilizzato, esiste innanzitutto l'elemento del rischio inerente all'investimento. L'ipotesi avanzata in questo scenario è certamente quella di anticipare le spese di progettazione, tenendo presente che, considerata la scaletta dei tempi, la parte preponderante dell'investimento, quella relativa alla costruzione, avverrà dopo che la base fisica necessaria al funzionamento di DEMO sarà stata dimostrata da ITER. Nel programma DEMO affermiamo – giustamente o meno – che siamo pronti ad anticipare progetti di ricerca e di sviluppo ma non a lanciare la costruzione senza avere la certezza della fisica. Ciò detto, a fronte dello schema adottato ovviamente ci possono essere persone disposte a correre maggiori rischi e altre che invece chiedono maggiori sicurezze e quindi si propongono di iniziare più tardi la realizzazione di DEMO onde poter effettuare ulteriori verifiche. In ogni caso in base alla scaletta temporale fornitavi potremo far partire DEMO solo nell'ipotesi in cui il progetto ITER avrà validato *ELMy H-Mode* alla fine della sua prima fase di operazione.

Per quanto concerne il cosiddetto «vangelo», le farò avere la famosa «*ITER physics basis*», ovvero l'opera pubblicata e aggiornata all'incirca un anno fa, in cui la comunità scientifica esperta in materia di fisica del plasma ha definito la base su cui è stato concepito ITER e le relative previsioni. Esiste quindi un «vangelo» considerato valido per la progettazione di ITER, adottato se non dalla totalità, certamente dalla stragrande maggioranza della comunità scientifica che si occupa di plasma. Tengo

in conclusione a ribadire che quello che abbiamo preso in esame è comunque uno degli scenari possibili.

VETRELLA (*PdL*). Devo però al riguardo sottolineare che vi sono delle incongruenze.

MAISSONIER. Francamente non comprendo il motivo della sua affermazione.

MESSINA (*PdL*). Dal momento che il nostro Paese partecipa a questo progetto con una quota pari al 9 per cento, vorrei sapere se nel mondo siano stati avviati progetti analoghi o se questo sia l'unico che la comunità scientifica internazionale sta portando avanti.

MAISSONIER. A livello mondiale non sono al corrente di progetti simili. Esistono progetti internazionali importanti, come quello dell'organizzazione per la ricerca nucleare CERN, anche se è un progetto principalmente europeo con collaborazioni americane che ha celebrato la cerimonia di inaugurazione dell'LHC (*Large hadron collider*) due mesi fa. In questo senso il progetto ITER è quindi davvero unico.

PRESIDENTE. Vorrei effettuare solo una precisazione. Ritengo che la formula $P_{\text{fusione}} = P_{\alpha} + P_{\text{riscaldamento addizionale}}$, contenuta nella documentazione (fornitaci nella *slide* n. 5) andrebbe letta e sarebbe più comprensibile se formulata nel seguente modo: $P_{\text{fusione}} = P_{\alpha} + P_{\text{neutroni}}$, posto che essa deve riguardare il totale della fusione, in caso contrario il fattore di moltiplicazione Q verrebbe meno.

Ringrazio il dottor Maisonnier per il suo magnifico italiano, per il tempo generosamente concessoci e per l'interessante presentazione con cui ha descritto le prospettive del programma ITER e il suo inquadramento futuro, nell'ambito dei quali ha lasciato intravedere anche gli aspetti che dovranno essere chiariti da uno sforzo di ricerca onde superare i diversi scogli tecnologici che si frappongono alla realizzazione di questo grande progetto.

Dichiaro conclusa l'audizione e rinvio il seguito dell'indagine conoscitiva in titolo ad altra seduta.

I lavori terminano alle ore 16.

