

MAURIZIO CUMO (*)

Nuovo nucleare: un possibile contributo italiano (**)

Se si volesse ordinare all'estero una moderna centrale elettronucleare da 1000, 1500 MWe da installare nel sito nucleare già qualificato di Trino Vercellese 2, o in quello di Trino Vercellese 1, accanto alla vecchia centrale in via di smantellamento, non vi sarebbero, a parte ovviamente i problemi di accettabilità sociale in sede locale e in sede nazionale, particolari problemi di natura tecnico-economica.

Si potrebbe svolgere una gara fra agguerriti costruttori multi-nazionali in breve tempo, si potrebbero richiedere ed ottenere alcune qualificate forniture nazionali, e nell'arco di sei, sette anni si potrebbe produrre energia elettrica con la nuova centrale. Una soluzione siffatta, «alla spagnola», è sempre possibile senza particolari impegni, se non finanziari, per il paese. In questo caso si avrebbero i benefici economici del basso costo dell'energia e dell'indipendenza strategica dell'approvvigionamento del combustibile; non si avrebbero, tuttavia, i benefici dello sviluppo industriale diretto e indiretto in un settore trainante d'avanguardia. Né si tratterebbe di «nuovo nucleare» come è inteso da noi, ma di una naturale evoluzione del nucleare che da trenta anni si costruisce nel mondo: «nuovo» perché modernamente allestito ed equipaggiato, ma tradizionale nella concezione e nel disegno. I grandi costruttori americani, giapponesi, tedeschi, francesi e svedesi hanno impostato programmi di sviluppo anche comuni e si sono scambiati esperienze e risultati, convergendo su linee di sviluppo tendenziali dei reattori della filiera ad acqua leggera nati, più di trenta anni or sono, dalla Westinghouse e dalla General Electric [1, 5]. È motivo di amarezza constatare a posteriori che i risultati che questo «nucleare avanzato» si propone di ottenere oggi erano già stati conseguiti, prima del «referendum» nucleari del 1987 e del blocco dei programmi, dal nostro Progetto Unificato Nucleare (PUN) praticamente condotto a termine a metà degli anni '80. Pertanto, seguire questo sviluppo per noi è relativamente facile: diciamo che venti o trenta ingegneri, della vecchia guardia, sono più che sufficienti per seguire le attività di progettazione se distaccati a rotazione presso i centri di progettazione stranieri e gli organismi di controllo nazionali. Un impegno di poco

(*) Socio dell'Accademia, ENEA, Roma.

(**) Conferenza inaugurale dell'Anno Accademico 1992, tenuta il 16 marzo 1992 nella Sede Accademica.

maggiore è richiesto per la partecipazione multi-nazionale al programma statunitense sui reattori di media potenza (600 MWe) ad «aumentata sicurezza passiva», vale a dire i progetti AP600 della Westinghouse e SBWR della General Electric che contano di superare l'esame tecnico per ottenere le necessarie licenze di costruzione in USA negli anni '90. Vi sarebbe spazio per partecipare a prove tecniche su componenti rilevanti ed iniziative in questo senso sono state già assunte dall'ENEA.

Uno spazio ben maggiore si presenta nel mercato delle piccole e medie taglie delle centrali (100-300 MWe) e della co-generazione elettricità-calore per usi civili e industriali. Questo segmento di mercato è tuttora aperto sia nei paesi industrializzati ove operano più società elettriche private o municipalizzate, sia in numerosi paesi emergenti dotati di modeste reti elettriche. Vi sono alcune circostanze che concorrono a rendere estremamente interessante un impegno italiano in questo settore e che dovrebbero essere attentamente valutate.

I più grandi paesi e i più grandi costruttori continuano ad essere impegnati fortemente nei reattori della presente generazione, a «sicurezza attiva», e non hanno alcun interesse ad introdurre altre macchine a «sicurezza passiva» o addirittura a «sicurezza intrinseca» che porrebbero una serie ipotetica sull'accettabilità sociale del loro nucleare ormai così sviluppato e diffuso. Ben diversa si presenta la situazione italiana.

I progetti dei reattori nucleari della presente generazione sono stati concepiti oltre quaranta anni fa e da allora sono stati sempre più complicati per renderli più sicuri, fino a giungere ad elevati gradi di complessità e di sicurezza. Oggi si può fare molto di meglio, partendo dalle stesse concezioni-base; negare ciò significherebbe ammettere che quaranta anni di ricerca scientifica e sviluppo tecnologico sono passati invano, cosa che è manifestamente assurda. Non avendo interessi pregressi alle spalle e situazioni da difendere, si può fare piazza pulita e guardare in avanti. Questo non significa, ovviamente, non tenere conto del preziosissimo patrimonio di esperienze che l'energia nucleare ha fornito soprattutto per quanto riguarda la sua sicurezza ed affidabilità, ma, al contrario, farne il miglior uso.

Guardando proprio all'esperienza pregressa, si nota come i costi dell'energia nucleare, dovuti principalmente alla voce capitale, siano stati fatti lievitare dalle costruzioni elettromeccaniche sui cantieri, rese necessarie soprattutto dalle crescenti dimensioni delle centrali. Un cambio sostanziale delle modalità costruttive (dal cantiere alla fabbrica) può realizzarsi con unità modulari di piccola taglia. Piccoli reattori possono essere costruiti e assemblati in officina e trasportati in blocchi sul sito della centrale, secondo una logica che è tipica delle unità «turbogas». In questo modo si conseguono, fra gli altri, due sostanziali vantaggi: la riduzione dei tempi, e quindi dei costi di costruzione (passando da sei-sette anni a meno della metà) ed un migliore controllo di qualità reso possibile dall'ambiente di lavoro più attrezzato, dalle maestranze più addestrate e da una migliore organizzazione del lavoro rispetto alle costruzioni in cantiere in cui le diverse squadre di operai civili, meccanici, elettrici si intralciano reciprocamente. I controlli necessari possono essere effettuati agevolmente anche da ispettori esterni, accorciando così i tempi di prova per il rilascio delle necessarie licenze. Questo nuovo modo di costruire i reattori, pre-assemblando componenti direttamente in officina, può costituire una carta vincente anche per il mercato tradizionale degli impianti nucleari: basta infatti pensare a unità

modulari per cui, assemblando più moduli nello stesso sito, si può raggiungere anche una elevata potenza di centrale. Il vantaggio economico sarebbe collegato ad un graduale adeguamento alla potenza elettrica richiesta dalla rete, con assi r avvicinati tempi di ordinazione dei nuovi moduli necessari. Un altro grande vantaggio sarebbe collegato alla standardizzazione dei moduli e alla loro lavorazione in serie, con benefici evidenti per la sicurezza, per la qualità e per i costi.

Una questione dibattuta è quella dell'«effetto scala» per la taglia delle unità, che penalizza economicamente le piccole taglie sotto il profilo del costo unitario. Questo sarebbe indubbiamente vero a parità di progetto, agendo unicamente sul fattore scala. Ma se si tratta di due progetti sostanzialmente diversi di cui quello di taglia più piccola è molto semplificato perché più moderno come concezione e perché può avvalersi di soluzioni tecnologiche improponibili per le taglie maggiori, allora le cose possono cambiare in maniera radicale, fino ad invertirsi, anche senza bisogno di tener conto degli effetti della standardizzazione, delle lavorazioni in serie e dei fattori di apprendimento tipici di queste costruzioni complesse.

Trattandosi di piccole unità (100-500 MWe) assemblabili in moduli indipendenti fino al raggiungimento di elevate potenze, è molto più facile predisporre in esse la possibilità della cogenerazione elettricità-calore, con il conseguimento di rendimenti globali assai più elevati. E ciò perché le necessità di calore sono generalmente molto più ridotte di quelle che sono rese disponibili dalle unità di grossa taglia e perché tecnicamente è più facile avvicinare un piccolo reattore a un centro urbano che non un grande reattore. La produzione di calore può interessare le reti di teleriscaldamento (sostituzione di vecchie caldaie a combustibile fossile), alcune specifiche lavorazioni industriali e la fornitura di acqua (dissalazione dell'acqua di mare).

Si sono così viste molte motivazioni che spingono un paese come il nostro, che non ha interessi pregressi, verso il segmento di mercato dell'impiantistica nucleare delle piccole unità modulari da costruirsi completamente in officina con lavorazioni in serie. Non si è parlato di quella che è la motivazione più importante, vale a dire della accettabilità sociale del prodotto, perché invero queste piccole unità possono, molto più agevolmente delle grandi, essere realizzate a «sicurezza intrinseca», vale a dire con la capacità di spegnersi e raffreddarsi per leggi di natura, senza bisogno dell'intervento dell'uomo o di sistemi di sicurezza energizzati (attivi).

Torneremo su questi concetti per un loro approfondimento; per il momento soffermiamoci sulla considerazione ovvia che se ineludibili leggi di natura garantiscono che, se qualcosa va storto, la reazione nucleare a catena viene interrotta ed il calore residuo di decadimento radioattivo viene asportato senza che sia richiesto alcun intervento dell'uomo o di sistemi di sicurezza dotati di sensori, pompe e motori, questo nucleare, cosiddetto della 2ª generazione, è molto più accettabile del primo che richiede piani di emergenza esterni alle centrali e tempi ristretti per gli operatori per assumere decisioni fondamentali per la sicurezza in caso di incidente.

Vi sono ulteriori circostanze che confortano una tale scelta operativa e che hanno anch'esse una grande importanza. Reattori di questo tipo possono essere della filiera ad acqua leggera, la filiera più nota e sperimentata per cui si dispone di numerosissimi dati di esercizio e di costruzione di componenti, nonché di detta-

gliate conoscenze della relativa fisica del reattore e del comportamento del ciclo del combustibile. Non vi è pertanto alcun bisogno di fare investimenti di ricerca sul ciclo del combustibile (il mercato è esattamente lo stesso di quello dei grandi reattori di potenza della presente generazione) ed identiche sono le soluzioni per il condizionamento delle scorie e l'immagazzinaggio dei rifiuti (stessi gli operatori, le modalità, i costi). Non vi sarebbe, in sostanza, alcuna possibile sorpresa per gli approvvigionamenti di combustibile e per le fasi del suo ciclo. Manifestamente altrettanto non potrebbe dirsi se, invece della filiera dominante ad acqua leggera, si ricorresse a impianti della filiera a gas ad alta temperatura o della filiera veloce a sodio. Le soluzioni sarebbero altrettanto interessanti ma non basterebbe più solo lavoro di progettazione, com'è per la filiera ad acqua leggera, ma occorrerebbero esperienze ed impianti di prova e, in ultima istanza, investimenti di gran lunga maggiori, tempi più lunghi, rischi maggiori. La fortunata circostanza della filiera ad acqua leggera, invece, avendo già disponibili tutti i dati sperimentali desiderabili, richiede solo abilità di progetto e pensiero ma non investimenti per effettuare esperienze o realizzare prototipi. Richiede progettazioni di dettaglio, verifiche di progetto, analisi probabilistica dei guasti, analisi di sicurezza e di impatto ambientale, ma niente di più che calcoli e progetti basati su strumenti noti e collaudati, perché l'impianto si può progettare fin nei suoi dettagli senza sorprese, trattandosi di ingegneria nota, di componenti noti, di materiali noti. Questa è una particolarità estremamente interessante, perché riduce enormemente i costi, i tempi e i margini di incertezza delle previsioni sulle lavorazioni di officina, che possono così essere programmate con un approfondito grado di dettaglio e con un elevato grado di confidenza.

A questo punto anche i costi possono essere determinati a tavolino con ottima approssimazione.

Per un altro processo fondamentale non sussisterebbero problemi di tempestività: l'esame del progetto da parte delle autorità preposte alla sicurezza nucleare, le quali hanno la possibilità ovviamente di compiere tutte le verifiche del caso e di richiedere tutti gli approfondimenti necessari, utilizzando strumenti di verifica anche in questo caso ben collaudati. L'appartenenza del progetto alla nota filiera ad acqua leggera semplifica enormemente le procedure per le verifiche di sicurezza, perché già si dispone di numerosi codici di calcolo convalidati da prove sperimentali che hanno richiesto ingenti capitali e lunghi tempi. Si può così pervenire ad un progetto regolarmente «licenziato» dalle autorità di sicurezza, sufficientemente dettagliato e pronto per essere realizzato senza sorprese di sorta. Negli USA, scottati da precedenti esperienze, si punta ora sullo «one step licensing», un solo permesso dell'autorità di controllo, la Nuclear Regulatory Commission, per approvare il progetto e costruire l'impianto senza dilazionare il tutto attraverso diversi progetti particolareggiati che rischiano di far allungare di molto i tempi. Lo «one step licensing» è chiaramente una importante pietra miliare per il rilancio dell'energia nucleare, e questa procedura potrebbe facilmente essere applicata al caso italiano perché il progetto può essere migliorato e modificato a tavolino fino al completo soddisfacimento delle esigenze dell'autorità di controllo. Si tratta manifestamente di lavorare, e di lavorare bene, ma niente di più. Vi sono in Italia le competenze per fare questo lavoro di progettazione e di calcolo, ma sono ancora disperse. Occor-

rerebbero due-trecento ingegneri, per lo più dipendenti di ENEA ed ENEL, per un arco temporale di due o tre anni. Si tratterebbe di persone già oggi impegnate nel settore nucleare, per cui non occorrerebbero finanziamenti diversi da quelli già previsti per questo personale. Occorre solo un loro impegno esplicito per un progetto di larga portata internazionale, che prima dovrebbe essere approvato e autorizzato in Italia e poi portato all'attenzione dei gruppi e degli organismi internazionali con un importante viatico nazionale.

Essendo il nostro paese il primo e l'unico ad essere preoccupato dai problemi della «sicurezza intrinseca» e ad avere congelato i propri programmi in attesa della soluzione di questi problemi, potrebbe svolgere un ruolo essenziale anche a livello internazionale, promuovendo questi progetti, portandoli in sede internazionale, e realizzandoli una volta raggiunto un largo consenso. Occorre ricordare che anche precisi obiettivi economici devono essere conseguiti, vale a dire il costo dell'energia prodotta deve essere inferiore a quello delle possibili soluzioni alternative con centrali a combustibile fossile dotate dei sistemi di desolfurazione e denitrificazione, rimanendo pur sempre il vantaggio ecologico della eliminazione della anidride carbonica, uno dei più temuti gas per l'effetto serra. Si tratta di una grande sfida e di una grande opportunità per l'ingegneria italiana, in particolare per quello che ancora rimane dell'ingegneria nucleare italiana. Vi sono molte condizioni ed uniche opportunità di successo. Occorre un impegno coordinato di due o tre anni. Al termine di questo periodo si potrebbe disporre di tutti gli elementi per decidere, con elementi di certezza alla mano, se avviare un limitato programma elettronucleare italiano certificato anche in sede internazionale. In questo caso la nostra industria potrebbe rilevare tutti gli elementi per procedere in maniera autonoma per le forniture italiane e per poter effettuare gli opportuni accordi per i mercati internazionali. È evidente che, in caso di successo, la nostra industria potrebbe porci in ruolo di avanguardia con il nuovo modo di costruzioni in officina e con i nuovi pre-assemblaggi certificati e collaudati.

Il rischio industriale sarebbe comunque fortemente ridotto dalla pre-esistenza di progetti dettagliati già completati da ENEA ed ENEL, con le forze lavoro già dedicate al nucleare e senza bisogno di particolari investimenti «ad hoc», progetti sottoposti e validati dalle autorità di controllo, con le forze già disponibili. Occorre solo determinazione ed impegno da parte di elementi qualificati presentemente dispersi, talora scoraggiati, e sotto-utilizzati in mille rivoli di scarsa consistenza. A una iniziativa nazionale in questo settore potrebbe utilmente affiancarsi l'università, con una importante azione di sostegno.

Le linee guida di un progetto innovativo nucleare di piccola-media taglia possono così riassumersi:

— dotare l'impianto dei dispositivi fondamentali per soddisfare ai requisiti, così come comunemente intesi, della sicurezza intrinseca: spegnimento della reazione nucleare a catena e rimozione del calore residuo di decadimento radioattivo con sistemi passivi;

— eliminazione delle cause degli incidenti iniziatori delle catene incidentali più pericolose che si considerano nelle analisi di sicurezza. Fra i principali, gli incidenti di perdita di refrigerante e di espulsione delle barre di controllo;

— massimo ricorso alle esperienze già maturate nella filiera dei reattori ad acqua leggera, che tanti miglioramenti hanno portato con reciproche interazioni fra le fasi di progetto, di costruzione e di esercizio. Introduzione dei più moderni accorgimenti;

— riduzione e collocazione dei componenti e dei sistemi in modo da poter realizzare l'impianto in officina e da poter ridurre al massimo le operazioni di assemblaggio sul sito. Sotto questo profilo un enorme passo in avanti lo si può compiere con l'introduzione dei collegamenti flangiati che consentono la facile sostituzione dei componenti e contribuiscono enormemente ad allungare la vita utile dell'impianto, fino a renderla indefinibile. Si riducono in tal modo i costi e si semplificano moltissimo anche le operazioni di smantellamento finale;

— allungamento dei periodi di ricarica del combustibile, ad esempio ogni tre anni, per aumentare il fattore di disponibilità e ridurre il lavoro di personale qualificato. Ricorso al combustibile più disponibile e commerciale per i reattori della presente generazione;

— studio del ciclo termodinamico associato in modo da favorire un'ampia gamma di soluzioni co-generative, con particolare riferimento alla dissalazione dell'acqua di mare;

— approntamento di una sistemazione impiantistica in cui più moduli possono essere progressivamente aggiunti con semplicità e in cui la sostituibilità dei componenti possa costituire una ulteriore garanzia per un ottimo fattore di disponibilità complessiva;

— riduzione della dose operativa a valori molto più bassi di quelli degli attuali impianti, sfruttando le caratteristiche innovative del progetto e le ridotte dimensioni del reattore;

— eliminazione dei piani di emergenza esterna, conseguente alle caratteristiche di sicurezza intrinseca del reattore. Queste caratteristiche dovrebbero influire profondamente sull'accettabilità sociale di questi impianti, anche senza tener conto del vantaggio ecologico connesso alla mancata emissione dei grandi quantitativi di CO₂ corrispondenti alla energia prodotta;

— adozione delle strumentazioni più avanzate già disponibili per i reattori ad acqua leggera della presente generazione per una completa automazione della gestione dell'impianto, fermo restando che i sistemi preposti alla sicurezza intrinseca agiscono comunque per loro conto secondo leggi di natura ed indipendentemente dalla volontà e dalla attenzione degli operatori;

— massimo sfruttamento di brevetti e licenze già in possesso della nostra industria, in modo da poter avviare da subito una produzione nazionale di cinquantasei unità modulari da installarsi in un complesso di circa mille MWe di potenzialità. In questa fase è essenziale la predisposizione di tutte le lavorazioni in officina e dei successivi controlli, in modo da minimizzare il tempo complessivo di allestimento e di arrivare a prodotti finiti già collaudati e certificati secondo le più avanzate procedure di garanzia della qualità. Per il trasporto sul sito e per l'assemblaggio finale vengono in officina pre-montati interi sistemi in apposite strutture di

sostegno che possono servire anche per il collaudo in officina e quindi per il trasporto.

A conclusione di queste note può essere utile ricordare che la Commissione Tecnica per la Sicurezza Nucleare e la Protezione Sanitaria definisce [1] la sicurezza intrinseca di un impianto nei riguardi di un evento avverso come la capacità che questo possiede di far fronte a detto evento in quanto ne elimina o ne riduce, al limite fino ad annullarli, gli effetti per caratteristiche «insite» nel processo, senza richiedere cioè interventi di qualsiasi natura. Caratteristiche di sicurezza intrinseca sono ottenibili, in linea di principio, mediante provvedimenti progettuali capaci di influire negli stessi parametri da cui derivano gli effetti indesiderati di determinati eventi. Ad es., per contrastare i pericoli derivanti da liberazioni incontrollate di reattività, bisogna utilizzare retroazioni stabilizzanti di reattività. Ove ciascuna parte di impianto potesse godere di tali caratteristiche nei riguardi di qualsiasi evento avverso, l'impianto, nella sua interezza, potrebbe essere definito «intrinsecamente sicuro». Va riconosciuto però che i provvedimenti di sicurezza intrinseca possono contrastare singole «caratteristiche a rischio» dell'impianto e hanno efficacia talvolta condizionata da limiti di progetto e/o da natura tecnologica. Pertanto, una sicurezza più avanzata può essere ottenuta realisticamente con un'opportuna integrazione di sicurezza intrinseca e di «sicurezza passiva».

Sempre secondo la Commissione Tecnica [1], per sicurezza passiva di un impianto si deve intendere la capacità che questo possiede di far fronte a un evento avverso mediante interventi di sicurezza svolti da sistemi autosufficienti, che non richiedono cioè apporti esterni di energia (elettrica o meccanica), di segnali intelligenti e di azioni umane. Al riguardo è opportuno precisare che le caratteristiche di sicurezza passiva:

— si distinguono da quelle di sicurezza intrinseca perché non sono «insite» nel processo di cui si vuole garantire la sicurezza, ma sono aggiunte ad esso mediante provvedimenti «ad hoc»;

— sono ottenute, come avviene per una classe di caratteristiche di sicurezza intrinseca, applicando, fin dove è possibile, semplici leggi naturali e sfruttando le proprietà dei materiali;

— sono in grado di fronteggiare soltanto determinate condizioni avverse o gruppi di condizioni di questo tipo per le quali risultano efficaci i provvedimenti progettuali adottati.

Poiché il corretto svolgimento delle funzioni di sicurezza passiva può essere influenzato da guasti od errori umani, ivi incluse azioni involontarie, è opportuno distinguere i sistemi e i componenti passivi in varie categorie, corrispondenti a diversi livelli di «passività», e cioè di relativa immunità da inconvenienti del tipo sopra evidenziato. In base alle concezioni e alle caratteristiche operative dei sistemi passivi praticamente richiesti e realizzabili si possono distinguere almeno le seguenti tre categorie:

— sistemi di tipo completamente statico (ad es. fondati sull'irraggiamento termico);

— sistemi fondati soltanto sul movimento di fluidi senza movimenti di parti meccaniche (ad es. per circolazione naturale);

— sistemi fondati sul movimento di fluidi e di parti meccaniche «passive» (ad es. valvole di non ritorno, dischi di rottura, ecc.).

Una quarta categoria di passività potrebbe includere una varietà di sistemi che eseguono «passivamente» le relative funzioni di sicurezza, ma sono attivati da sottosistemi non passivi (ad es. sensori e logiche dotati di sorgenti di energia dedicate). Tali sottosistemi dovranno essere progettati con caratteristiche di immunità da guasti o errori umani confrontabili con quelle dei sistemi passivi da essi attivati. In pratica, almeno per quanto riguarda la disponibilità su domanda, i sistemi di questa categoria non differiscono da quelli interamente passivi che eseguono le medesime funzioni di sicurezza.

Non va dimenticato che la filosofia generale di sicurezza degli impianti nucleari del mondo occidentale è, da sempre, quella della difesa «in profondità» attraverso successive linee. La prima linea, detta «preventiva», è basata su una buona progettazione e realizzazione dell'impianto, condotte secondo le metodologie della garanzia di qualità. La seconda linea, detta «protettiva», interviene se un guasto dovesse propagarsi o manifestarsi nonostante la prima linea. Essa fa ricorso a macchinari e supporti atti a fronteggiare le conseguenze degli incidenti più temuti. Se anche questa seconda linea dovesse essere sorpassata da una imprevista catena incidentale, interviene la terza linea di difesa, detta «mitigativa». Essa è costituita da strutture fisiche e sistemi atti a trattenere la radioattività che altrimenti si libererebbe nell'ambiente esterno. Tipicamente il contenitore in cemento armato e tutte le apparecchiature di supporto sono espressione di questa terza linea mitigativa, la cui presenza a Three Miles Island e la cui assenza a Chernobyl hanno fatto la differenza fra le conseguenze esterne dei due incidenti. Una quarta linea di difesa è costituita dal piano di emergenza esterno, che fa uso delle reti di monitoraggio e può prevedere l'evacuazione, preventivamente pianificata, della popolazione.

A queste successive linee di difesa «in profondità» si accoppiano metodologie di realizzazione degli impianti quali la ridondanza dei sistemi di sicurezza, la eliminazione delle cause comuni di guasto, la separazione fisica dei sistemi ridondanti, la diversificazione fisica di sensori, strumenti e motori. Tutto ciò ha condotto a un elevatissimo grado di sicurezza delle centrali elettronucleari occidentali, per cui ulteriori miglioramenti sono al tempo stesso difficili e difficilmente valutabili.

Una linea di sviluppo potrebbe essere quella di approntare dei contenitori esterni capaci di trattenere quasi tutta la radioattività che possa liberarsi al loro interno, in modo da rendere inutile l'evacuazione della popolazione circostante. In tal modo i reattori nucleari all'interno potrebbero essere del vecchio tipo. Addirittura, rasentando il ridicolo, si potrebbero porre reattori a sicurezza intrinseca entro contenitori a tenuta stagna. Naturalmente i progetti devono preventivamente dimostrare la convenienza economica rispetto alle possibili fonti di energia competitive.

Più difficile da dimostrare sono i vantaggi indiretti del ricorso a tecnologie avanzate, come quelle del nucleare, in altri settori industriali. Ma per questo può essere sufficiente esaminare quanto avviene negli altri paesi che hanno adottato il nucleare e considerare le relative ricadute industriali. Il fatto che l'Italia sia, fra i paesi sviluppati, il fanalino di coda per l'«export» delle tecnologie avanzate è comunque una circostanza che dovrebbe far riflettere.

Concludendo, si può constatare che nel nuovo nucleare vi è uno spazio di grande interesse che il nostro paese potrebbe riempire subito senza sopportare ulteriori costi rispetto a quelli che già sostiene per il personale degli enti energetici tutt'ora destinato al nucleare. Le linee di sviluppo di questa attività, essenzialmente di progetto, sono state qui indicate nei limiti generali. Alla base delle prospettive di successo di una simile attività vi è una ricerca [5], condotta fin dal 1984 presso l'Università di Roma «La Sapienza», che ha mostrato chiaramente i vantaggi che si possono conseguire (figg. 1-5). Vi sono quindi risultati preliminari già disponibili che confermano la serietà di una tale iniziativa e ne illustrano la portata. È indubbio che sarebbe più logico partire da subito, in un simile progetto, con l'appoggio dell'industria nazionale e questo contributo lo si potrebbe ottenere, trattandosi di solo lavoro di progettazione, con impegni modesti. Ma, al limite, il lavoro potrebbe essere effettuato dal personale dei soli enti di stato e passare all'industria solo in fase di realizzazione, vale a dire solo dopo che si è dimostrata la fattibilità economica e che si sono ottenuti i necessari permessi da parte dell'autorità di controllo. Riguardo alla collaborazione internazionale e al consenso internazionale, data la loro riconosciuta importanza anche per interessanti segmenti di mercato all'estero, è evidente che bisogna fare di tutto per conseguire questi risultati. Esistono gruppi stranieri che sono già partiti su questa strada, che guardano con interesse al mercato italiano quando ripartirà e che sono evidentemente in posizione di competizione. Ad esempio gli USA vanno avanti con i loro progetti AP600 e SBWR e possono «imbarcarci» con notissime possibilità di manovra da parte nostra. Un discorso più o meno analogo lo si potrebbe fare con il progetto PIUS della ABB svedese, anche se con maggiori margini di contributo da parte nostra; ma vi sono diversi altri progetti in fase di sviluppo nel settore delle piccole e medie taglie, almeno una decina. Ora è evidente che fra un proliferare indiscriminato di progetti nazionali ed un impossibile consenso generalizzato su un unico progetto internazionale (per rivalità economiche ed industriali) esiste un ragionevole compromesso graduabile, tanto più perseguibile quanto più intelligente è la via intrapresa ed interessanti i risultati di progetto conseguiti. Certo è che non dobbiamo essere aprioristicamente disposti a chiamare «internazionale» solo ogni progetto straniero cui ci possiamo aggregare con il duplice ruolo di «trascinati» sul piano scientifico-tecnico e di «sponsor» finanziari. In tal caso si può anche rinunciare ad un riconoscimento solo formale per il nostro appoggio finanziario ed attendere di ordinare dei nuovi reattori solo dopo che saranno costruiti all'estero e solo dopo che le loro caratteristiche si siano dimostrate tali da meritare l'accettabilità della nostra opinione pubblica. Ma se vi è, come vi è, la possibilità di presentare un nostro progetto che può guadagnare gradualmente terreno sul piano internazionale superando diversi punti strategici di confronto a partire da quelli economici, si può mettere ugualmente in moto una macchina scientifico-tecnologica che non introduce nuovi costi e che stimola le risorse nazionali ad una nobile gara di pensiero che comunque induce tutte le positive ricadute che sempre si hanno quando ci si impegna in un settore di punta.

Una iniziativa nazionale in questo senso, data la eccezionale situazione in cui si è venuto a trovare il nostro paese, ha comunque una serie di positivi effetti garantiti:

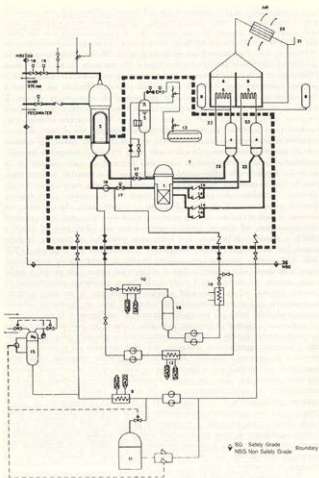


Fig. 1 - Schema di flusso del reattore MARS; la linea tratteggiata delimita la parte più propriamente nucleare dell'impianto.

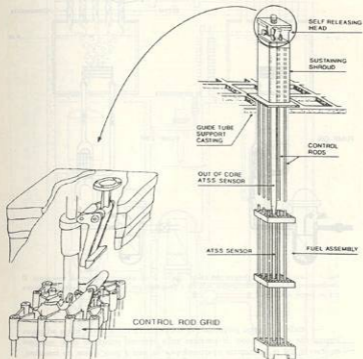


Fig. 2 - Schema del dispositivo di sgancio per dilatazione termica differenziale delle barre di controllo supplementari, la cui caduta spegne il reattore, in caso di anomala sopravvalutazione di temperatura del refrigerante nel nocciolo. Oltre queste barre sono previste le usuali barre di controllo dei reattori ad acqua pressurizzata.

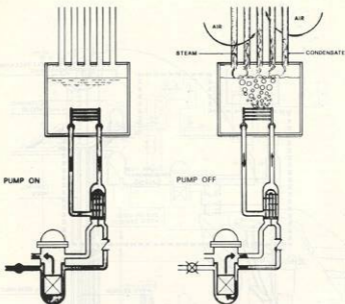


Fig. 3 - Circuito per la rimozione del calore residuo di decadimento in caso di emergenza. Il condensatore ad aria schematicamente indicato è progettato per funzionare in maniera «passiva» per un tempo indefinito.

— studio e sviluppo progettuale di componenti e sistemi della filiera ad acqua leggera che ci consentono di rimanere nella corrente principale dello sviluppo nucleare e che ci permettono «partnerships» da pari a pari, e non da trascinati, anche sugli altri progetti di cui è tutta da verificare l'accettabilità in Italia;

— risultati intermedi di verifica sul duplice fronte della «nostra» accettabilità sociale delle soluzioni proposte (per poter riavviare un programma elettronucleare) e della loro convenienza economica;

— risultati intermedi di aggregazione di parti del consenso internazionale mano a mano che le evidenze progettuali si fanno manifeste e concrete.

Vi è una gradualità di questo processo che può essere conseguita con diversi obiettivi intermedi che consentono, con bilanci progressivi, di avanzare in condizioni di certezza e con minime esposizioni. Non è quindi, assolutamente, una

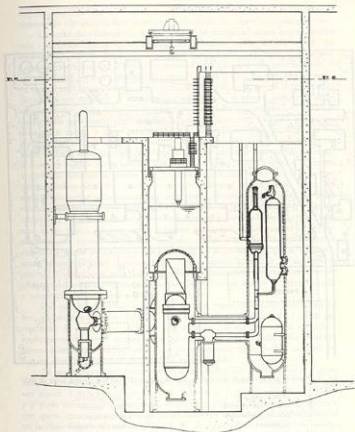


Fig. 4 - Spaccato del circuito primario che indica le connessioni flangiate per consentire le fabbricazioni in officina e i montaggi sul sito. Il circuito primario è racchiuso in un contenitore esterno pressurizzato alla stessa pressione del primario per eliminare la principale causa di incidenti (perdita di refrigerante, eiezione di barre di controllo).

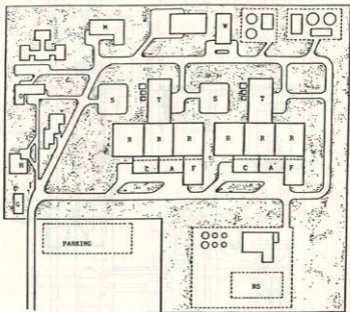


Fig. 5 - Possibile sistemazione in una centrale di 6 moduli MARS per una potenza totale di 1020 MWc.

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| A = Edificio ausiliari | O = Centro operazioni |
| B = Edificio sala controllo | R = Edificio reattore |
| E = Edificio combustibile | RS = Deposito rifiuti |
| G = Guardiaia | S = Quadro di comandi |
| H = Centro sanitario | T = Edificio turbina |
| M = Edificio manutenzione | W = Magazzino |

impresa azzardata senza ritorno ma una iniziativa costantemente indirizzabile e aggristabile che può, in ogni momento, coinvolgere altre forze nazionali ed estere.

La scelta del combustibile «tradizionale» dei reattori ad acqua leggera elimina tutti i problemi che sarebbero connessi ad un nuovo e non necessario ciclo del combustibile, rende disponibili molti fornitori (anche nazionali) e garantisce l'approvvigionamento ed il livello dei prezzi. Come noto a livello internazionale, le soluzioni finali per la sistemazione dei rifiuti radioattivi sono già state trovate anche se, dato il ridottissimo volume delle scorie, si ritiene di avere ancora alcuni decenni disponibili per scegliere le soluzioni migliori. Inoltre, in questo periodo è anche verosimile che nuove soluzioni si aggiungano a quelle già consolidate, comprese quelle della separazione degli attinidi dai prodotti di fissione che così potrebbero decadere e ridursi a rifiuti comuni nel giro di poche centinaia di anni, con un possibile riciclo degli attinidi nei reattori nucleari per una loro progressiva distruzione. In Italia esiste ancora il problema di reperire un unico deposito nazionale per le scorie di bassa e media attività, dato che finora queste sono depositate in più siti e dato che continua ad esservi una produzione nazionale anche per le numerose utilizzazioni mediche [6]. Sarebbe opportuno utilizzare questo tempo anche per mettere più ordine nella sistemazione delle scorie e costituire un servizio che possa efficacemente operare per molti decenni a venire. Si tratta di risolvere problemi semplici, le cui soluzioni sono ampiamente provate, e che richiedono impegni finanziari molto ridotti. Rinviare queste soluzioni può creare motivi generici di opposizione ad una ripresa del nucleare in Italia, anche se si giungerà rapidamente a dimostrare che si può ripartire con la costruzione di moduli a sicurezza intrinseca, senza bisogno di piani di emergenza, economicamente preferibili ad altri tipi di centrali. Trattandosi di una doverosa azione di sistemazione razionale delle scorie ereditate dall'attività pregressa sul nucleare [6] e da altre attività sanitarie, è inutile e comunque dannoso procrastinarne l'attuazione.

Dal mondo accademico, su questi temi, il paese si attende una chiara ed inequivocabile indicazione che contemperi tutte le ansie, le incertezze, i timori per una fonte di energia che ha legato, suo malgrado, la sua origine alla terrificante applicazione militare. È appena il caso di ricordare i problemi che pone lo smaltimento delle testate nucleari ed il loro «bruciamento» nelle centrali esistenti nel mutato clima internazionale di fine della guerra fredda.

Le applicazioni economiche, tecnologiche, ecologiche si intrecciano e si accavallano. L'opinione pubblica ha bisogno quanto mai di chiari, semplici e disinteressati segnali. L'Accademia Nazionale delle Scienze ha la statura scientifica e morale e il ruolo istituzionale per esercitare una azione di guida. È con questo spirito e con questo intento che sottopongo queste riflessioni al giudizio dei Colleghi perché ne facciano oggetto di una meditazione, ne accolgano o ne respingano le conclusioni ma, soprattutto, ne prendano spunto per formulare un preciso indirizzo per la nazione che su materie così complesse non può più procedere a colpi di «referendum».

- In circa un terzo di secolo l'energia nucleare è giunta a fornire più di un sesto della generazione mondiale di elettricità. Nella Comunità europea tale contributo è del 35%. L'esperienza accumulata si misura in oltre 6000 reattori/anno, oltre 400 impianti in esercizio, per circa 330.000 MWe. Ad oggi, il contributo del nucleare per l'eliminazione della CO₂ ammonta al 6% delle emissioni totali;
- tutti i nuovi progetti di reattori cosiddetti «avanzati» si possono schematicamente suddividere in due gruppi. Un gruppo detto «evolutivo», che si basa sul miglioramento di tecnologie provate e di esperienze conseguite, ed un gruppo detto «innovativo», che introduce nuove caratteristiche soprattutto per quanto riguarda i sistemi di sicurezza. Un elemento distintivo fra i due gruppi può essere la necessità, o meno, di un prototipo dimostrativo;
- ad oggi esistono almeno venti progetti «avanzati» in fase di sviluppo. Le loro parole-guida sono: sicurezza accresciuta, affidabilità aumentata, prestazioni economiche migliori;
- l'impresa nucleare sta diventando sempre più una impresa globale. Di qui l'esigenza di una diffusa standardizzazione, di comuni criteri di sicurezza e di una base generale di consenso con un utilizzo comune di tutte le esperienze fin'ora maturate nelle diverse applicazioni;
- ci si aspetta che i cosiddetti «reattori avanzati» siano almeno altrettanto sicuri dei migliori reattori della presente generazione e presentino caratteristiche spinte di sicurezza che abbiano impatto sull'opinione pubblica, ad es. con l'eliminazione dei piani di emergenza esterni e l'allungamento dei «periodi di grazia» (intervalli di tempo dopo l'innesco degli incidenti in cui gli automatismi si sostituiscono agli operatori e non è necessario alcun loro intervento) ad almeno più di mezz'ora.

Rif. [4] *Nuclear Power, a fresh start* - Conference Documentation, London Marriot Hotel, W1, 13-14 November 1991. IBC Technical Services Ltd.

- Si prospettano tre fasi:
 - sviluppo di nuovi criteri di sicurezza finalizzati a una tecnologia nucleare per cui siano fisicamente impossibili incidenti catastrofici;
 - valutazione delle proposte e dei progetti sotto il profilo della fattibilità industriale;
 - realizzazione di un programma di sviluppo per i progetti più attraenti, in una collaborazione internazionale che abbia come fine il conseguimento di una accettabilità generalizzata della nuova energia nucleare.
- Nell'ex Unione Sovietica vi sono 16 unità RBMK (come quella di Chernobyl) che producono circa la metà dell'energia elettronucleare di quella regione. L'International Advisory Committee e il Panel Sakharov hanno entrambi stimato

- che il rischio di un altro grave incidente è nell'ordine del 50% in cinque anni. Ciò richiede che tali impianti siano messi fuori esercizio, con gravi conseguenze economiche.
- In Gran Bretagna la privatizzazione dell'energia nucleare non ha potuto essere realizzata per i costi, precedentemente sottostimati, dello smantellamento dei vecchi reattori a gas. Manifestamente nei nuovi progetti occorre tener conto anche di questi costi, minimizzandoli, perché l'energia nucleare può essere attraente anche per il settore privato.
 - In Francia si punta a ridurre la probabilità di fusione del nocciolo a meno di uno su un milione di reattori/anno. Una parte importante di questo sforzo è la eliminazione totale dei rischi di fusione in condizioni di pressurizzazione.
 - Nella Germania unificata vi sono cinque reattori VVER di progetto sovietico e altri cinque in fase di costruzione. Un esame del loro stato di sicurezza ha portato le autorità di quel paese a concludere che anche costosi interventi di miglioramento non darebbero la certezza di poter conseguire le necessarie licenze di esercizio.
 - Un regime internazionale di sicurezza nucleare è fortemente auspicato da molti paesi. L'IAEA è sollecitata a muoversi in questo senso.
 - Nelle analisi di sicurezza è opportuno mantenere la distinzione fra eventi incidentali interni ed esterni agli impianti.
 - Il concetto di «difesa in profondità» andrebbe rinforzato da un altro concetto di sicurezza di «difesa per progetto» con i tre obiettivi, in ordine gerarchico, di «funzionalità» «sicurezza» ed «economicità».

RI. (2) IAEA: *The Role of the Agency in Advanced Reactor System Development*, Vienna, 18-21 November 1991.

DIFESA IN PROFONDITÀ

La filosofia generale di sicurezza degli impianti nucleari del mondo occidentale è, dall'inizio, quella della difesa «in profondità» attraverso successive linee.

La prima linea, detta «preventiva», è basata su una buona progettazione e realizzazione dell'impianto, condotte secondo le metodologie della garanzia di qualità.

La seconda linea, detta «protettiva», interviene se un guasto dovesse propagarsi o manifestarsi nonostante la prima linea. Essa fa ricorso a macchinari e supporti atti a fronteggiare le conseguenze degli incidenti più temuti.

La terza linea detta «mitigativa» è costituita da strutture fisiche e sistemi atti a trattenerne la radioattività che altrimenti si libererebbe nell'ambiente esterno. Tipicamente il contenitore in cemento armato e tutte le apparecchiature di supporto sono

espressione di questa terza linea mitigativa, la cui presenza a Three Miles Island e la cui assenza a Chernobyl hanno fatto la differenza fra le conseguenze esterne dei due incidenti. Una quarta linea di difesa è costituita dal piano di emergenza esterno, che fa uso delle reti di monitoraggio e può prevedere l'evacuazione, preventivamente pianificata, della popolazione.

A queste successive linee di difesa «in profondità» si accoppiano metodologie di realizzazione degli impianti quali la ridondanza dei sistemi di sicurezza, la eliminazione delle cause comuni di guasto, la separazione fisica dei sistemi ridondanti, la diversificazione fisica di sensori, strumenti e motori. Tutto ciò ha condotto a un elevatissimo grado di sicurezza delle centrali elettronucleari occidentali, per cui ulteriori miglioramenti sono al tempo stesso difficili e difficilmente valutabili.

-
- I reattori di piccola e media potenza (SMR) sin'ora proposti vanno da una potenza di 10 MW termici ad una di 600 MW elettrica.
 - I loro progettisti ne enunciano le caratteristiche con gli aggettivi: «Smaller, Simpler, Safer».
 - Caratteristiche comuni di molti progetti di SMR sono le seguenti:
 - un progetto d'insieme molto più semplice;
 - margini di sicurezza accresciuti, intervalli di tempo più lunghi prima che sia necessario l'intervento di operatori;
 - disegni integrati (eliminazione di circuiti esterni);
 - riduzione delle dimensioni delle tubature;
 - eliminazione di alcuni circuiti di emergenza;
 - aumento della capacità termica del refrigerante nel «pressure vessel»;
 - adozione di sistemi «passivi» per la rimozione del calore residuo di decadimento;
 - penetrazioni nel «pressure vessel» spostate nella parte superiore, in modo da ostacolare il drenaggio del refrigerante del nocciolo;
 - adozione di sistemi «passivi» di refrigerazione d'emergenza;
 - minimizzazione del numero delle strutture sistemiche, impiego di isolatori sismici.

Rif. [3] Nuclear Energy Agency (OECD): *Small and Medium Reactors - Status and Prospects - Report by an Expert Group*, Paris 1991.

Una iniziativa nazionale in questo senso, data la eccezionale situazione in cui si è venuto a trovare il nostro paese, ha comunque una serie di positivi effetti garantiti:

- studio e sviluppo progettuale di componenti e sistemi della filiera ad acqua leggera che ci consentono di rimanere nella corrente principale dello sviluppo nucleare e che ci permettono «partnerships» da pari a pari, e non da trascinati, anche sugli altri progetti di cui è tutta da verificare l'accettabilità in Italia;
- risultati intermedi di verifica sul duplice fronte della «nostra» accettabilità sociale delle soluzioni proposte (per poter riavviare un programma elettronucleare) e della loro convenienza economica;
- risultati intermedi di aggregazione di parti del consenso internazionale mano a mano che le evidenze progettuali si fanno manifeste e concrete.

Vi è una gradualità di questo processo che può essere conseguita con diversi obiettivi intermedi che consentono, con bilanci progressivi, di avanzare in condizioni di certezza e con minime esposizioni. Non è quindi, assolutamente, una impresa azzardata senza ritorno ma una iniziativa costantemente indirizzabile e aggiustabile che può, in ogni momento, coinvolgere altre forze nazionali ed estere.

LINEE GUIDA DI UN PROGETTO NUCLEARE INNOVATIVO DI PICCOLA-MEDIA TAGLIA

- dotare l'impianto dei dispositivi fondamentali per soddisfare ai requisiti, così come comunemente intesi, della sicurezza intrinseca: spegnimento della reazione nucleare a catena e rimozione del calore residuo di decadimento radioattivo con sistemi passivi;
- eliminazione delle cause degli incidenti iniziatori delle catene incidentali più pericolose che si considerano nelle analisi di sicurezza. Fra i principali, gli incidenti di perdita di refrigerante e di espulsione delle barre di controllo;
- massimo ricorso alle esperienze già maturate nella filiera dei reattori ad acqua leggera, che tanti miglioramenti hanno portato con reciproche interazioni fra le fasi di progetto, di costruzione e di esercizio. Introduzione dei più moderni accorgimenti;
- riduzione e collocazione dei componenti e dei sistemi in modo da poter realizzare l'impianto in officina e da poter ridurre al massimo le operazioni di assemblaggio sul sito. Sotto questo profilo un enorme passo in avanti lo si può compiere con l'introduzione di collegamenti flangiati che consentono la facile sostituzione dei componenti e contribuiscono enormemente ad allungare la vita utile dell'impianto, fino a renderla indefinibile. Si riducono in tal modo i costi e si semplificano moltissimo anche le operazioni di smantellamento finale;

- allungamento dei periodi di ricarica del combustibile, ad esempio ogni tre anni, per aumentare il fattore di disponibilità e ridurre il lavoro di personale qualificato. Ricorso al combustibile più disponibile e commerciale per i reattori della presente generazione;
- studio del ciclo termodinamico associato in modo da favorire un'ampia gamma di soluzioni co-generative, con particolare riferimento alla dissalazione dell'acqua di mare;
- approntamento di una sistemazione impiantistica in cui più moduli possono essere progressivamente aggiunti con semplicità e in cui la sostituibilità dei componenti possa costituire una ulteriore garanzia per un ottimo fattore di disponibilità complessiva;
- riduzione della dose operativa a valori molto più bassi di quelli degli attuali impianti, sfruttando le caratteristiche innovative del progetto e le ridotte dimensioni del reattore;
- eliminazione dei piani di emergenza esterna, conseguente alle caratteristiche di sicurezza intrinseca del reattore. Queste caratteristiche dovrebbero influire profondamente sull'accettabilità sociale di questi impianti, anche senza tener conto del vantaggio ecologico connesso alla mancata emissione dei grandi quantitativi di CO₂ corrispondenti alla energia prodotta;
- adozione delle strumentazioni più avanzate già disponibili per i reattori ad acqua leggera della presente generazione per una completa automazione della gestione dell'impianto, fermo restando che i sistemi preposti alla sicurezza intrinseca agiscono comunque per loro conto secondo leggi di natura ed indipendentemente dalla volontà e dalla attenzione degli operatori;
- massimo sfruttamento di brevetti e licenze già in possesso della nostra industria, in modo da poter avviare prontamente una produzione nazionale di cinque-sei unità modulari da installarsi in un complesso di circa mille MWe di potenzialità. In questa fase è essenziale la predisposizione di tutte le lavorazioni in officina e dei successivi controlli, in modo da minimizzare il tempo complessivo di allestimento e di arrivare a prodotti finiti già collaudati e certificati secondo le più avanzate procedure di garanzia della qualità. Per il trasporto sul sito e per l'assemblaggio finale vengono in officina premontati interi sistemi in apposite strutture di sostegno che possono servire anche per il collaudo in officina e quindi per il trasporto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Commissione Tecnica per la Sicurezza Nucleare e la Protezione Sanitaria: *Relazione del Gruppo di Studio sui reattori di nuova generazione a più elevata sicurezza*, Roma, 10 luglio 1991.
- [2] I.A.E.A.: *The Role of the Agency in Advanced Reactor System Development*, Vienna, 18-21 November 1991.
- [3] Nuclear Energy Agency (OECD): *Small and Medium Reactors - Status and Prospects*, Report by an Expert Group, Paris 1991.
- [4] *Nuclear Power, a fresh start*, Conference Documentation, London, Marriott Hotel, W1, 13-14 November 1991, organised by IBC Technical Services Ltd.
- [5] Università di Roma La Sapienza: *MARS, Multipurpose Advanced Reactor, inherently Safe*, Luglio 1990, Roma.
- [6] Commissione Tecnica per la Sicurezza Nucleare e la Protezione Sanitaria: *Gestione dei rifiuti radioattivi in Italia - considerazioni e suggerimenti*, Roma, 7 febbraio 1990.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Padova, 8 Novembre 1991