

POLITECNICO DI TORINO
ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE
ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
ANNO 2009 - SECONDA SESSIONE

Ramo: Ingegneria Nucleare.

Tema N.1

Oggetto del tema: Su possibili tecniche di reclutamento di qualificate risorse umane, in previsione del ritorno dell'Italia all'utilizzo dell'energia nucleare da fissione.

1 Premessa.

Lo scenario qui considerato è quello del ritorno dell'Italia allo sfruttamento dell'energia da fissione, da realizzarsi in tempi brevi e con coinvolgimento di tutte le potenzialità scientifico-tecnologiche e industriali del paese.

Nel quadro di un programma nazionale, finalizzato alla rapida qualificazione di risorse umane nel settore strategico della "Fisica dei Reattori Nucleari", il Ministero delle Attività Innovative (è il famoso MAI, di recentissima istituzione), insieme ad Enti Pubblici di Ricerca e a Confindustria, hanno proposto che, a valle di corsi intensivi di *teoria dei reattori a fissione*, impartiti ad un selezionatissimo insieme di Ingegneri e Fisici, vengano proposti dei test qualificanti. Il loro superamento potrà aprire a tali laureati, come forma **esclusiva** di reclutamento, l'accesso ad impieghi, stabili e retribuiti a livello internazionale, nel settore energetico-nucleare in Italia.

La Commissione Esaminatrice degli Esami di Stato per l'abilitazione all'esercizio della professione di Ingegnere (II Sessione 2009) si onora di proporre ai Laureati in Ingegneria Nucleare del vecchio ordinamento alcuni dei test di cui sopra, come argomento del presente tema d'esame.

2 Posizione dei problemi

2.1 Primo test

Si consideri un dominio di volume V , convesso e semplicemente connesso, di contorno ∂V , occupato da un mezzo moltiplicante omogeneo. Questo dispositivo sia tale da costituire un reattore *sottocritico*.

Si assuma che sia stato preliminarmente risolto per il dominio V il classico problema di Helmholtz:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \varphi(\vec{r}) &= -B_G^2 \cdot \varphi(\vec{r}), & \text{per } \vec{r} \in V - \partial V; \\ \varphi(\vec{r}_S) &= 0, & \text{per } \vec{r}_S \in \partial V,\end{aligned}$$

almeno per quanto attiene all'autofunzione fondamentale $\varphi(\vec{r})$ (quella che non cambia mai di segno in V) e al corrispondente autovalore principale $-B_G^2 < 0$ dell'operatore laplaciano.

Si ammetta poi che, ai presenti fini, sia sufficiente trattare questo sotto-critico nell'ambito della semplice teoria della *diffusione temporale monocinetica*, caratterizzando il mezzo con le *cinque* usuali costanti materiali: v (velocità dei neutroni); D (coefficiente di diffusione); Σ_c (sezione d'urto macroscopica di cattura parassita); Σ_f (sezione macroscopica di fissione); ν (numero di neutroni secondari per fissione). Da queste discendono le "grandezze derivate intensive" $\Sigma_a \doteq (\Sigma_f + \Sigma_c)$ (sezione d'assorbimento); $k_\infty \doteq (\nu\Sigma_f/\Sigma_a)$ (costante di moltiplicazione del mezzo infinito); $L^2 \doteq D/\Sigma_a$ (area di diffusione), nonché tutte le altre, quali, ad es., la probabilità di non fuga, il k_{eff} , la vita media, che dipendono anche dalle dimensioni e dalla geometria del dispositivo tramite B_G^2 .

Si richiede di :

D1) determinare il *transitorio di flusso neutronico* che si innescherà nel sistema a seguito della creazione in esso del seguente stato iniziale:

$$\Phi_0(\vec{r}) = A \cdot v \cdot \frac{\varphi(\vec{r})}{\int \int \int_V \varphi(\vec{w}) d\vec{w}} \quad ,$$

il quale, ovviamente, descrive la presenza, all'istante $t = 0$, di A neutroni in totale, distribuiti entro V secondo l'armonica fondamentale di Helmholtz della geometria in esame. Per la determinazione del transitorio, è qui ammesso avvalersi di formule note da manuali, che andranno richiamate e poi particolarizzate per il caso in esame;

D2) *calcolare* il numero N_L dei neutroni che sfuggono dal contorno ∂V , nonché quello N_A dei neutroni assorbiti (sia in modo parassita che per causare fissioni) entro V *durante l'intero transitorio* di spegnimento;

D3) *verificare* che, se si potesse idealmente variare il solo ν , lasciando inalterate tutte le altre grandezze fisiche per modificare il k_∞ :

i) il valore della somma $(N_L + N_A)$ sarebbe una funzione *monotona crescente* di k_∞ in tutto l'intervallo $k_\infty \in [0, (1 + L^2 B_G^2)[$ di sottocriticità;

ii) se il materiale moltiplicante avesse $k_\infty = 0$, i valori che si troverebbero per N_L ed N_A verrebbero a coincidere esattamente con gli analoghi che si ottengono, quando si sostituisce il mezzo moltiplicante con un semplice moderatore, caratterizzato da valori di D e Σ_a identici a quelli del materiale moltiplicante in esame, e si opera nei due casi alla stessa temperatura, per mantenere invariato il valore di v . Si trova, in particolare, in questo caso, come risultato ben prevedibile, che $(N_L + N_A) = A$, da leggersi così: tutti i neutroni presenti all'inizio o sfuggono dal contorno ∂V oppure sono catturati entro V ;

iii) invece, per $k_\infty \in]0, (1 + L^2 B_G^2)[$, risulta che è $(N_L + N_A) > A$, nonostante che tutti i reattori il cui k_∞ appartiene a tale intervallo, permangano in stato di *sottocriticità*. Dunque un sottocritico *dissipa* nel transitorio, in fughe o catture al suo interno, *più neutroni di quanti ne contenesse all'istante iniziale*. Inoltre,

all'avvicinarsi di k_∞ all'estremo destro dell'intervallo semiaperto $[0, (1+L^2 B_G^2)[$, si trova che $(N_L + N_A) \rightarrow \infty$;

D4) dopo di averli verificati, si *fornisca una spiegazione fisica* dei risultati descritti in **D3)**, in modo da renderli plausibili.

Si supponga ora di dover nuovamente affrontare il problema d'evoluzione sottocritica di cui in D1) , introducendo però una modellizzazione fisica un pò più adeguata alla realtà. Si scelga ancora la teoria della diffusione monocinetica temporale per i neutroni, ma si tenga conto, almeno approssimativamente, del fenomeno delle *emissioni ritardate*. Si introduca, per semplicità, una sola famiglia di nuclidi precursori, caratterizzata dai parametri β e λ . Il transitorio di spegnimento in questo caso avrà un carattere assai più complesso di quello sopra determinato, anche se *l'inhour equation*, nella presente riformulazione del problema, si riduce ad una eq. algebrica di secondo grado.

Si richiede di :

D5) ricalcolare il transitorio di spegnimento nell'ambito del modello di cui sopra, adattando eventualmente al presente caso delle formule note da manuali. Verificare inoltre che i valori di N_L ed N_A che si trovano con questo nuovo modello coincidono, a parità di composizione materiale e di geometria, con quelli trovati col modello precedente, che è molto più elementare. (Sarà utile ricordare, nell'esecuzione dei calcoli con presenza di ritardati, quali relazioni intercorrano tra i coefficienti di un'equazione di secondo grado e la somma o il prodotto delle sue radici).

D6) Nell'applicare il modello teorico con emissioni ritardate al problema di cui in D1) è stato ovvio assumere che la concentrazione dei precursori di ritardati fosse nulla per $t = 0$. Quindi appare chiaro che, in sottocriticità, nel corso del transitorio di spegnimento, innescato dall'inserimento di A neutroni, la concentrazione dei precursori non potrà che crescere in una prima fase del transitorio, per poi diminuire in modo monotono, e tendere asintoticamente a zero, con la stessa costante di tempo del flusso neutronico.

Si richiede di *determinare l'istante $T_M > 0$* , nel quale la concentrazione dei precursori raggiunge il suo massimo.

Inoltre ci si può chiedere se sia possibile *rispondere a priori e senza calcoli* alla seguente domanda: "Quali valori di N_L ed N_A si troveranno nel caso che il transitorio sottocritico (prevedibilmente assai più lungo del precedente!) sia stato innescato inserendo all'istante $t = 0$ nessun neutrone e A precursori di ritardati, disposti anch'essi secondo l'armonica fondamentale?"

2.2 Secondo test

D7) E' richiesto qui di determinare, in teoria a due gruppi energetici, *l'equazione critica* per un reattore sferico, il cui combustibile è uniformemente distribuito

nella shell sferica $p < r < R$, mentre il volume della sfera centrale, di raggio p , è occupato da un moderatore omogeneo, che funge da *riflettore interno*. Nella regione $r > R$ esiste il vuoto. (Per questa analisi potrà essere vantaggioso usare la forma stazionaria della teoria degli "pseudopotenziali cinetici". E' inoltre ammesso imporre, per entrambi i flussi neutronici, l'azzeramento sulla stessa superficie esterna $r = R$).

Ai fini dei *vincoli di sicurezza*, si descriva inoltre quali cautele vadano prese in ogni procedimento risolutivo come questa, se si vuole avere l'assoluta certezza di evitare che soluzioni matematicamente corrette del problema in esame (soluzioni che sono essenzialmente riferibili alla possibile individuazione di autostati stazionari di ordine superiore al posto di quello fondamentale) possano condurre a situazioni altamente pericolose.

2.3 Terzo test

Nella storia della Fisica dei Reattori, a partire dal 1940 in poi, è stata sviluppata **una pluralità procedimenti sperimentali**, (ad es.: pile esponenziali, per misure di sezioni d'urto macroscopiche e di buckling materiale; esperimenti pulsati, per misurare Σ e D ; esperimenti di approccio alla criticità, per individuare massa e/o composizione critica di una data struttura moltiplicante; misure di struttura fina, per caratterizzare i reticoli moltiplicanti, calibrazione di barre di controllo; tecniche PCTR o "physical constants testing reactors" per valutare, con aggiunta al materiale fissile di un opportuno veleno, la moltiplicatività di un reticolo; misure su singoli elementi di combustibile,...etc.) che hanno fornito un supporto essenziale allo sviluppo della disciplina. La ripetizione in laboratorio e la comprensione fisica dei risultati di questi esperimenti sarebbero a tutt'oggi molto utili ai fini della formazione del personale tecnico-scientifico. Però, a causa dei grandi progressi nella conoscenza delle sezioni d'urto dei diversi materiali, dell'enorme aumento delle prestazioni dei metodi di calcolo, e soprattutto per ragioni di costo, la più parte di questa sperimentazione oggi non è più ritenuta essenziale.

Ai fini della formazione di risorse umane, sarebbe comunque opportuno che alcuni esperimenti classici della fisica dei reattori fossero quantomeno ripetuti nell'ambito di simulazioni matematiche di tipo iterativo o probabilistico.

D8) E' richiesto di illustrare brevemente (in non più di due pagine) le basi fisiche, l'importanza e la presumibile efficacia formativa di due tra le tecniche sperimentali di cui sopra, affinché si possa valutare l'opportunità di simulare la loro esecuzione in laboratorio mediante un'appropriate e ben più economica tecnica di *sperimentazione numerica*.

Nota I Candidati sono invitati a fornire *ordinatamente* le risposte R1, R2, ..., R8, ai quesiti D1, D2, ..., D8, esprimendole nella forma tipica di una **relazione professionale a carattere tecnico-scientifico**. Eventuali minute non potranno essere prese in considerazione dalla Commissione esaminatrice.