

ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE

PRIMA SESSIONE 2018 - SEZIONE A

SETTORE INDUSTRIALE

PROVA PRATICA DI PROGETTAZIONE

TEMA 5: TEMA DI ENERGETICA - NUCLEARE

I reattori russi VVER-1000, di tipo PWR, sono progettati per produrre una potenza termica nominale pari a 3000 MW_t . Il core del reattore è composto da assembly esagonali contenenti ciascuno 331 barrette di combustibile. Ogni barretta è costituita da un nucleo centrale di ossidi di uranio, con raggio r_f , ed è rivestita da uno strato di Zircaloy avente spessore s_c . All'interno dell'assembly, le barrette sono disposte come nel reticolo rappresentato in Figura 1, dove la linea tratteggiata indica il canale di raffreddamento che si può considerare per ogni singola barretta. Le grandezze di riferimento per le barre sono riportate in Tabella 1.

Studio del reattore a potenza nominale

1. La potenza termica lineare q' , generata nelle barre di combustibile, ha un valore medio pari a $q' = 15.752 \text{ kW}_t/\text{m}$. Il Candidato calcoli il **numero di assembly** presenti nel reattore ed il valore della **potenza volumetrica massima**, q'''_{max} , relativo alla barra di combustibile posta al centro del reattore.
2. Il refrigerante utilizzato per raffreddare il reattore è mantenuto ad una pressione di 150 bar, entra nel reattore con una temperatura uniforme pari a 291°C ed esce dal reattore con una temperatura media di 321°C . Utilizzando i valori riportati in Tabella 1, il Candidato calcoli la **portata di fluido refrigerante**.
3. Si consideri il sottocanale relativo alla barra posta al centro del reattore. Il Candidato calcoli il **numero di Reynolds per il canale e**, utilizzando la correlazione di Dittus-Boelter per il calcolo del numero di Nusselt

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4},$$

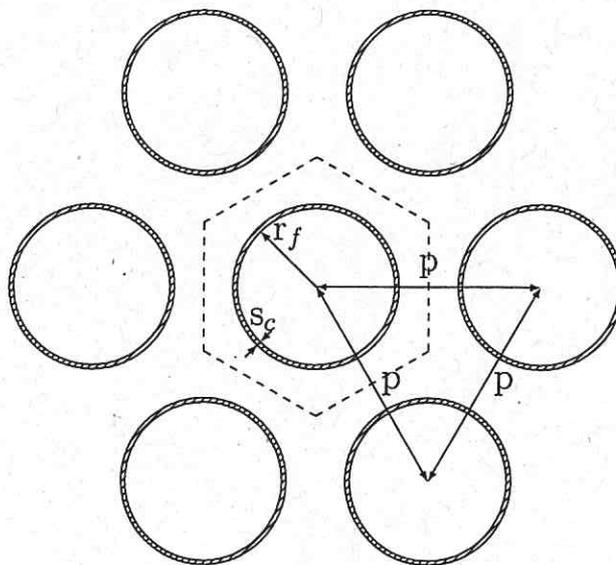


Figura 1: Rappresentazione schematica della disposizione delle barre di combustibile.

Handwritten signatures and initials: "GC" and "me" are visible at the bottom right of the page.

ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE

PRIMA SESSIONE 2018 - SEZIONE A

SETTORE INDUSTRIALE

PROVA PRATICA DI PROGETTAZIONE

TEMA 5: TEMA DI ENERGETICA - NUCLEARE

Geometria	Passo reticolo	p	0.0122	m
	Altezza barrette	h_{bar}	3.53	m
Moderatore	Calore specifico	$c_{p,m}$	$5.742 \cdot 10^{-3}$	MJ/kgK
	Densità	ρ_m	703	kg/m ³
	Viscosità cinematica	ν_m	$1.199 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
	Conducibilità termica	k_m	$5.416 \cdot 10^{-7}$	MW/mK
Combustibile	Calore specifico	$c_{p,f}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	MJ/kgK
	Densità	ρ_f	$1.09 \cdot 10^4$	kg/m ³
	Conducibilità termica	k_f	$1.903 \cdot 10^{-6}$	MW/mK
	Raggio	r_f	0.0039	m
Cladding	Conducibilità termica	k_c	$1.73 \cdot 10^{-5}$	MW/mK
	Spessore	s_c	0.00065	m
Cinematica	Frazione neutroni ritardati	β	0.0065	-
	Costante decadimento ritardati	λ	0.08	1/s
	Tempo di generazione medio	Λ	10^{-5}	s

Tabella 1: Grandezze di riferimento per lo studio del reattore VVER-1000.

si calcoli il valore del **coefficiente** h di scambio termico fra la superficie esterna del cladding ed il fluido refrigerante. Dopo aver calcolato le **resistenze termiche** per lo strato di cladding e per il combustibile, il Candidato ricavi le **espressioni dei campi**:

- T_b , temperatura di bulk del fluido
- T_c , temperatura del cladding sulla superficie esterna della barra
- T_s , temperatura di interfaccia combustibile-cladding
- T_m , temperatura del combustibile, misurata lungo l'asse della barra

in funzione dell'ordinata z , ricordando che la potenza termica varia lungo la coordinata assiale come $q'''(z) = q'''_{max} \cos(\pi z/h_{bar})$. Per ciascuno dei quattro campi il Candidato calcoli i **valori massimi e le relative posizioni**.

Analisi del reattore con modello punto Per lo studio del reattore con modello punto si consideri, per semplicità, che le barre siano composte solo dal combustibile, trascurando la presenza dello strato di cladding (raggio delle barre $r = r_f + s_c$). Si considerino l'equazione cinetica punto linearizzata ad un solo gruppo di ritardati, con i valori riportati in Tabella 1, e l'equazione per il modello punto termoidraulico della zona di combustibile. All'istante $t = 0^-$ il sistema è in equilibrio con popolazione neutronica $n(0^-) = n_0$, reattività $\rho(0^-) = 0$, concentrazione di ritardati $C(0^-) = C_0$

ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE

PRIMA SESSIONE 2018 - SEZIONE A

SETTORE INDUSTRIALE

PROVA PRATICA DI PROGETTAZIONE

TEMA 5: TEMA DI ENERGETICA - NUCLEARE

e temperatura media di combustibile $T_f(0^-) = T_{f,0} = 568^\circ\text{C}$. Al tempo $t = 0^+$ viene iniettata una reattività $\rho_1 = 0.0025$, per cui la reattività $\rho(t)$ può essere modellata come

$$\rho(t) - \rho(0^-) = \rho_T - \delta(t)\rho_1 = \alpha_{T_f}(T_f - T_{f,0}) + \delta(t)\rho_1,$$

con $\alpha_{T_f} = -5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ controreattività termica e $\delta(t)$ distribuzione delta di Dirac.

1. Si calcoli il valore della **popolazione neutronica** n_0 nella condizione stazionaria, considerando la seguente formula per la produzione di potenza termica

$$P_{th} = n_0 \Sigma_f \bar{\nu} E_r V_f,$$

con energia media per fissione $E_r = 200 \text{ MeV}$, V_f volume del combustibile e $1/\Sigma_f \bar{\nu} = \Lambda \nu$ con $\nu = 2.4$. Dall'equazione stazionaria per il modello punto della zona di combustibile si ricavi il valore del **coefficiente di scambio termico medio** h_{fm} .

2. Si scriva il sistema di equazioni linearizzate per il sistema perturbato.
3. Usando le trasformate di Laplace e le equazioni linearizzate ottenute al punto precedente, si calcolino le **funzioni di trasferimento** $H(s)$, $I(s)$ e $L(s)$, definite come

$$\tilde{T}_f = H(s)\tilde{n}, \quad \tilde{\rho}_T = I(s)\tilde{n}, \quad \frac{\tilde{n}}{n_0} = L(s) \left(\frac{\rho_1}{s} + \tilde{\rho}_T \right)$$

e si studi la **stabilità** della funzione

$$\tilde{n} = n_0 \frac{L(s)\rho_1}{s(1 - n_0 L(s)I(s))}$$

usando il criterio di Routh.

4. Si determinino le **soluzioni asintotiche** di $n(t)$, $c(t)$, $\rho(t)$ e $T_f(t)$ per $t \rightarrow \infty$.

