

POLITECNICO DI TORINO

**ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
II SESSIONE - ANNO 2001**

Ramo Nucleare

TEMA N. 2

E' richiesto il progetto di massima dei principali componenti del sistema di trasporto del calore di un prototipo dimostrativo del reattore nucleare innovativo denominato Amplificatore d'Energia.

Si tratta di un reattore con nocciolo sottocritico alimentato con i neutroni veloci prodotti dalla reazione di spallazione indotta da un fascio di protoni ad alta energia, generato da un acceleratore di particelle del tipo ciclotrone.

La reazione di spallazione si verifica nella regione centrale del nocciolo, dove il fascio di protoni interagisce con l'eutettico piombo - bismuto, utilizzato quale fluido termovettore per la refrigerazione del nocciolo.

Gli elementi di combustibile sono simili a quelli dei reattori veloci refrigerati a sodio liquido, seppure con differenti valori dei parametri geometrici.

Il refrigerante primario cede la potenza termica attraverso quattro scambiatori di calore intermedi collegati in parallelo rispetto al reattore, alimentati lato secondario da fluido diatermico, che viene quindi inviato ad altrettanti scambiatori di calore fluido diatermico - aria, dove la potenza viene dissipata all'atmosfera.

Il circuito primario è contenuto in un vessel, completamente riempito di piombo - bismuto, con una configurazione a "pool" simile a quella dei reattori veloci refrigerati con metallo liquido. Gli scambiatori intermedi sono posizionati all'interno del vessel nella parte alta della piscina.

La potenza termica e le temperature dei fluidi primario e secondario sono riportate in tabella 1.

Tabella 1	
potenza termica trasferita al refrigerante nel nocciolo	80 MW
numero di scambiatori intermedi (collegati in parallelo rispetto al reattore)	4
temperatura di ingresso del fluido primario negli scambiatori di calore intermedi (eutettico piombo - bismuto)	400 °C
temperatura di uscita del fluido primario dagli scambiatori di calore intermedi	300 °C
temperatura di ingresso del fluido secondario negli scambiatori intermedi (fluido diatermico)	280 °C
temperatura di uscita del fluido secondario dagli scambiatori intermedi	320 °C

La configurazione geometrica degli scambiatori intermedi è rappresentata schematicamente in fig. 1.

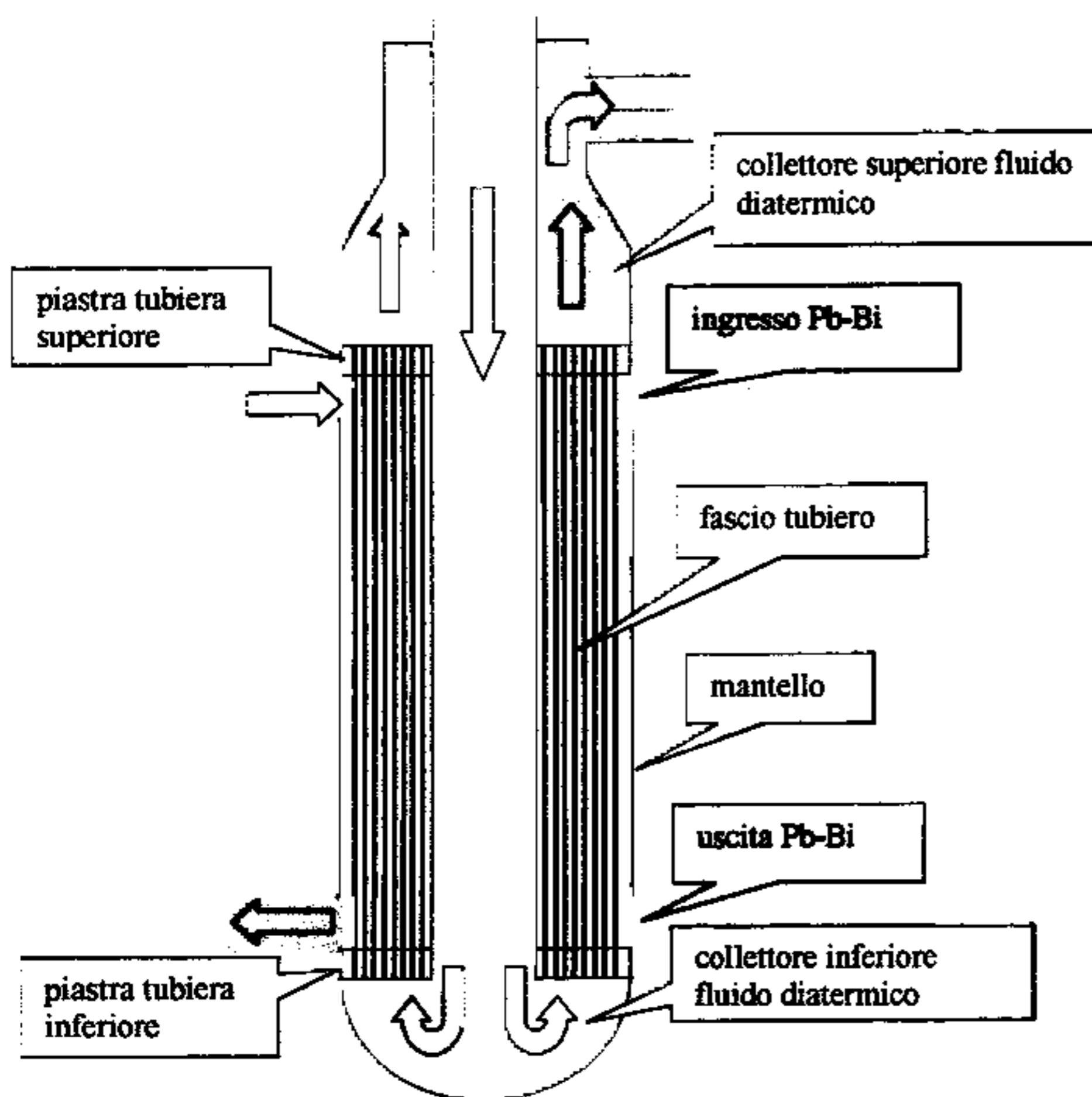


Fig. 1 - Rappresentazione schematica dello scambiatore intermedio (non in scala).

Gli scambiatori intermedi, immersi nella piscina, sono del tipo a fascio tubiero e mantello con asse verticale. Il fascio tubiero, costituito da tubi lisci, è racchiuso in un mantello cilindrico verticale che presenta, alle estremità superiore e inferiore, delle opportune aperture destinate all'ingresso e all'uscita dell'eutettico piombo - bismuto. I tubi del fascio tubiero fanno capo ai due collettori di ingresso e uscita del fluido diatermico. Il collettore inferiore è alimentato da un condotto verticale discendente, che evita la presenza di penetrazioni nella parete del vessel e di tubazioni di ingresso del fluido diatermico all'interno della piscina.

Il fluido diatermico all'uscita del condotto discendente inverte il verso del deflusso ed entra nei tubi, che percorre in moto ascendente, in controcorrente rispetto all'eutettico piombo - bismuto, che lambisce i tubi dall'esterno in moto discendente.

Si richiede lo sviluppo dei punti seguenti:

1. determinazione delle portate in massa dell'eutettico piombo - bismuto e del fluido diatermico;
2. dimensionamento di massima dello scambiatore di calore intermedio;
3. dimensionamento di massima delle tubazioni di collegamento tra gli scambiatori intermedi e gli scambiatori di calore fluido diatermico - aria;
4. determinazione della portata di aria;
5. scelta di un'opportuna configurazione per gli scambiatori fluido diatermico - aria.

Nello sviluppo del punto (2) si richiede in particolare di:

- scegliere il reticolo del fascio tubiero;
- assumere i diametri interno ed esterno dei tubi del fascio tubiero;
- determinare il numero di tubi del fascio tubiero, la loro lunghezza e il passo del reticolo in modo tale che la somma delle cadute di pressione per attrito e localizzate dell'eutettico piombo - bismuto nello scambiatore intermedio non superi il valore di 4500 Pa;
- calcolare le cadute di pressione per attrito e localizzate del fluido diatermico.

Nel calcolo delle cadute di pressione per attrito sia lato tubi che lato mantello si assuma una rugosità assoluta di 0,00005 m; si assuma inoltre che le cadute di pressione localizzate lato piombo - bismuto siano pari al 20 % di quelle dovute all'attrito continuo del piombo - bismuto nel fascio tubiero.

Il Candidato effettui anche un'analisi critica della configurazione dello scambiatore intermedio, mettendone in evidenza gli eventuali problemi costruttivi ed operativi.

Nello sviluppo del punto (3) si richiede la scelta dei diametri interno ed esterno delle tubazioni, col vincolo che la caduta di pressione per attrito continuo nelle tubazioni non superi il valore di 0,004 bar/m, assumendo una rugosità assoluta di 0,00005 m.

Nello sviluppo dei punti (4) e (5) occorre assumere la temperatura dell'aria all'ingresso e all'uscita degli scambiatori di calore; occorre inoltre indicare una tipologia di scambiatore di calore adatta alla rimozione della potenza termica con aria.

Per una stima delle pressioni dell'eutettico piombo - bismuto e del fluido diatermico si tengano presenti gli elementi seguenti:

- al di sopra degli scambiatori intermedi vi è un battente di 1 m di eutettico piombo - bismuto e sul pelo libero del piombo - bismuto vi è gas inerte a pressione atmosferica;
- il fluido diatermico può essere utilizzato, alle temperature di lavoro precedentemente indicate, anche a pressione atmosferica;
- la circolazione del fluido diatermico è assicurata da apposite pompe.

Tutti i componenti sono realizzati in acciaio inossidabile AISI 316L.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori medi delle proprietà termofisiche del piombo - bismuto, del fluido diatermico e dell'acciaio; sono inoltre riportati tipici valori dei diametri dei tubi unificati e una formulazione per il calcolo del coefficiente di scambio termico dell'eutettico piombo - bismuto.

Tabella 2 - Proprietà termofisiche dell'eutettico piombo - bismuto

calore specifico	143,24	J/(kg°C)
densità	10263,5	kg/m ³
viscosità dinamica	2,37E-03	kg/(m s)
conducibilità termica	13,33	W/(m°C)

Tabella 3 - Proprietà termofisiche del fluido diatermico

calore specifico	2510	J/(kg°C)
densità	822	kg/m ³
viscosità dinamica	4,60E-04	kg/(m s)
conducibilità termica	0,102	W/(m°C)

Tabella 4 - Proprietà termofisiche dell'aria a pressione atmosferica

temperatura °C	calore specifico J/(kg°C)	densità kg/m ³	viscosità cinematica m ² /s	conducibilità termica W/(m°C)
0	1005	1,293	13,28 10 ⁻⁶	0,0244
50	1005	1,003	17,95 10 ⁻⁶	0,0283
100	1009	0,946	23,13 10 ⁻⁶	0,0321
160	1017	0,815	30,09 10 ⁻⁶	0,0364
200	1026	0,746	34,85 10 ⁻⁶	0,0393
250	1038	0,674	40,61 10 ⁻⁶	0,0427
300	1047	0,615	48,33 10 ⁻⁶	0,0460

Tabella 5 - Conducibilità termica e tensione ammissibile dell'acciaio inossidabile AISI 316 L

conducibilità termica	18	W/(m °C)
tensione ammissibile	110	N/mm ²

Tabella 6 - Valori tipici dei diametri esterni e degli spessori dei tubi usati nella costruzione degli scambiatori di calore

diametro esterno (mm)	10	14	20	25	30	44.5
spessore (mm)	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5

Tabella 7 - Diametri esterni e spessori dei tubi da utilizzare per le tubazione di collegamento

diametro esterno (mm)	spessori (mm)	diametro esterno (mm)	spessori (mm)	diametro esterno (mm)	spessori (mm)	diametro esterno (mm)	spessori (mm)
13.5	1, 1.5, 2	33.7	1.5, 2, 2.5, 3	60.3	1.5, 2, 2.5, 3	133	1.5, 2, 2.5, 3
17.2	1, 1.5, 2	38	1.5, 2, 2.5, 3	70	1.5, 2, 2.5, 3	139.7	1.5, 2, 2.5, 3
20	1, 1.5, 2	42.4	1.5, 2, 2.5, 3	76.1	1.5, 2, 2.5, 3	159	1.5, 2, 2.5, 3
21.3	1, 1.5, 2	45	1.5, 2, 2.5, 3	88.9	1.5, 2, 2.5, 3	168.3	1.5, 2, 2.5, 3
25.4	1, 1.5, 2	48.3	1.5, 2, 2.5, 3	101.6	1.5, 2, 2.5, 3	219.1	2, 2.5, 3, 4
26.9	1, 1.5, 2	54	1.5, 2, 2.5, 3	108	1.5, 2, 2.5, 3	273	2, 2.5, 3, 4
30	1, 1.5, 2	57	1.5, 2, 2.5, 3	114.3	1.5, 2, 2.5, 3	323.9	2, 2.5, 3, 4

Tabella 8 - Coefficiente di scambio termico dell'eutettico piombo - bismuto

$$h_{\text{pb-Bi}} = 0,625 \frac{k}{d_{\text{idr}}} \text{Pe}^{0,4}$$

il Numero di Peclet è dato da: $\text{Pe} = \text{Re Pr}$; il numero di Reynolds è espresso dall'usuale formulazione: $\text{Re} = \frac{\rho v d_{\text{idr}}}{\mu}$; ρ è la densità; il diametro idraulico è calcolato con l'espressione

$$d_{\text{idr}} = \frac{4A}{P_b}, \text{ dove } A \text{ e } P_b \text{ sono rispettivamente l'area della sezione di passaggio e il perimetro}$$

bagnato del sottocanale individuato dal reticolo scelto per i tubi dello scambiatore; v è la velocità media relativa alla sezione di passaggio; la formula è valida per $10^2 < \text{Pe} < 10^4$.