MARINHA DO BRASIL

SERVIÇO DE SELEÇÃO DO PESSOAL DA MARINHA

GABARITO DESENVOLVIDO

CP-CEM/ 2025 - ENGENHARIA NUCLEAR

1ª QUESTÃO (8 pontos)

a) Alargamento Doppler. (2 pontos)

b) O isótopo Urânio-238 tem ressonâncias estreitas para capturas de nêutrons. No entanto, quando a temperatura do combustível aumenta, tem-se um alargamento das linhas de ressonância da seção de choque de captura causado pelo movimento térmico dos átomos no combustível, resultando num aumento da probabilidade de absorção ressonante, pois a linha de ressonância se alarga. Esse alargamento tem mais peso no aumento da taxa de captura radioativa de nêutrons do que a diminuição do pico, levando a um aumento da taxa de ocorrência desse tipo de absorção. (3 pontos)

c) O Alargamento Doppler contribui com reatividade negativa para o balanço de reatividade do núcleo do reator. Isso ocorre porque o alargamento da faixa energética de captura radioativa retira mais nêutrons do núcleo levando a uma diminuição da reatividade. (3 pontos)

2ª QUESTÃO (8 pontos)

a) Podem ser considerados: (3 pontos)
– Surgimento de Produtos de Fissão com seções de choque de absorção consideráveis, como o Xenônio e Samário;
- Efeito Doppler;
- Coeficientes de Temperatura.
Outras respostas podem ser aceitas a critério da banca.

b) Podem ser considerados: (3 pontos)
– Transparência ao fluxo de nêutrons (baixa seção de choque de absorção);
- Boa condutividade Térmica;
- Resistência a altas temperaturas;
- Alta resistência a Corrosão;
- Capacidade de conter os produtos de fissão;
- Comportamento Mecânico adequado.
Outras respostas podem ser aceitas a critério da banca.

c) Zircaloy, Aço Inoxidável, Etc
Deve ser citada uma das características aceitas no item b condizente com o material citado. (2 pontos)

3ª QUESTÃO (8 pontos)
fótons/cm

a)

$$E = \sum_T H_T w_T$$

$$E = H_{pele} w_{pele} + H_{fígado} w_{fígado} + H_{superfície\ óssea} w_{superfície\ óssea}$$

$$E = 50\ (0{,}01) + 45(0{,}04) + 35(0{,}01)$$

$$E = 0{,}50 + 1{,}80 + 0{,}35$$

$$E = 2{,}65\ mSv$$ (4 pontos)

b)

$$E = \sum_T H_T w_T$$

$$E = H_{superfície\ óssea} w_{superfície\ óssea} + H_{pele} w_{pele} + H_{cérebro} w_{cérebro} + H_{glândulas\ salivares} w_{glândulas\ salivares}$$

$$E = 20\ (0{,}01) + 20(0{,}01) + 20(0{,}01) + 20(0{,}01)$$

$$E = 0{,}20 + 0{,}20 + 0{,}20 + 0{,}20$$

$$E = 0{,}80\ mSv$$ (4 pontos)

4ª QUESTÃO (8 pontos)

a) Paula está correta. Dado que já foi aplicado um fator de ponderação (tabela 2) na fórmula de dose equivalente (tabela 1), em que os efeitos biológicos destas duas radiações têm seus impactos levados em conta. Desta forma, o mesmo valor de Dose Efetiva de qualquer radiação tem, em tese, o mesmo impacto para o corpo humano. (2 pontos)

b) Polietileno, devido à alta seção de choque de espalhamento proporcionada pela presença de muitos átomos de hidrogênio em sua composição química. (3 pontos)

c) O chumbo é mais eficiente devido ao seu alto número atômico, o que lhe propicia uma grande eletrosfera. Como a radiação gama interage com esta, quanto maior o número atômico, maior será a interação da radiação com o átomo e melhor será a blindagem. (3 pontos)

5ª QUESTÃO (8 pontos)

a) Seja N o número de varetas combustíveis no núcleo:

Número de Espaços no Elemento Combustível = 17x17 = 289

Tubos-Guias por Elemento Combustível = 20

Total de Varetas Combustíveis por EC = 269

N: 193 x 269 = 51917 (2 pontos)

b) Seja V_R o volume de revestimento de uma vareta combustível.

Seja V_T o volume ocupado pelo material de revestimento de um tampo.

Seja V_c o volume ocupado pelo material do revestimento do corpo da vareta.

Desta forma, tem-se:

$$V_R = V_C + 2V_T$$

$$V_c = Volume\ Cilindro\ Externo\ da\ Vareta - Volume\ do\ Cilindro\ Interno\ da\ Vareta$$

$$V_c = h_c.\pi.\left(\frac{Diâmetro\ Externo}{2}\right)^2 - h.\pi.\left(\frac{Diâmetro\ Interno}{2}\right)^2$$

$$h_c = h - 2h_T$$

$$h_c = 365{,}8 - 2\ (5{,}0) = 355{,}8$$

$$V_c = 355{,}8\ .\pi.\left[\left(\frac{0{,}914}{2}\right)^2 - \left(\frac{0{,}892}{2}\right)^2\right]$$

$$V_c = 355{,}8\ .\ (3{,}14).\ [(0{,}457)^2 - (0{,}446)^2]$$

$$V_c = 355{,}8\ .\ (3{,}14).\ [(0{,}457)^2 - (0{,}446)^2]$$

$$V_c = 355{,}8\ .\ (3{,}14).\ [0{,}2088 - 0{,}1989]$$

$$V_c = 355{,}8\ .\ (3{,}14).\ [0{,}0099]$$

$$V_C = 11{,}06\ cm^3$$

$$V_T = h_T.\pi.\left(\frac{Diâmetro\ Externo}{2}\right)^2$$

$$V_T = 5{,}0\ .\ 3{,}14\ .\left(\frac{0{,}914}{2}\right)^2$$

$$V_T = 5{,}0 \,.\, 3{,}14 \,.\, (0{,}457)^2$$

$$V_T = 3{,}2789\ cm^3$$

$$V_R = 11{,}06 + 2\ (3{,}2789)$$

$V_R = 17{,}6178\ cm^3$ (3 pontos)

c) Seja m_r a massa de revestimento em uma vareta combustível.

$$m_r = V_r \,.\, \rho_r$$

$$m_r = 17{,}6178\ cm^3 . 6{,}5\ g/cm^3$$

$m_r = 114{,}5157\ g$ (2 pontos)

d) Seja M a massa de revestimento no núcleo em Toneladas.

Do item a, N = 51917

Do item c, $m_r = 114{,}5157\ g$

$M = N . m_r = 51917 \,.\, 114{,}5157\ g$

$M = 51917 \,.\, 114{,}5157\ g$

$$M = 5\,945\,311{,}5969\ g$$

$$M = 5\,945{,}312\ kg$$

$M = 5{,}945\ toneladas$ (1 ponto)

6ª QUESTÃO (8 pontos)
□ 1,092x10
a)
(i) A interrupção de água de alimentação do GV faz com que a água que circula no primário não seja resfriada pelo circuito secundário, entrando no núcleo pela perna fria praticamente na mesma temperatura em que saiu pela perna quente. Nessa condição, a potência gerada no combustível continua a aquecer a água do primário, sendo necessário o trip do reator para que a água pare de aquecer. A pressão da água do primário aumenta proporcionalmente ao aumento de sua temperatura, expandindo em volume e elevando a fase líquida no pressurizador. (2 pontos)

(ii) O *trip* do reator leva à diminuição da potência gerada no núcleo, mas ainda é necessária a retirada de calor residual dos elementos combustíveis. Com o refrigerante ainda em leve aquecimento, a pressão do primário tenderá a subir, enquanto a fase líquida no PZ comprimirá a fase gasosa. Ao passar do limite de sobrepressão designado para o equipamento, é dado o sinal de abertura da válvula de alívio do PZ. (2 pontos)

(iii) Com a válvula do PZ aberta e o núcleo ainda com a necessidade de retirada de seu calor residual, a pressão do primário irá diminuir com o inventário de água saindo pela válvula de alívio. O calor fornecido pelo combustível ainda está causando o aquecimento da água, que, por não ter uma fonte fria para ser resfriada e retirar calor dos elementos combustíveis, está entrando em ebulição e vazando pela válvula do PZ. Como o problema não foi identificado e nenhuma manobra foi realizada para sanar o mau funcionamento da válvula, a perda de inventário do primário levou a esvaziamento do núcleo, que, sem água para resfriar os elementos, acabou derretendo. (2 pontos)

b) Uma vez que a reação em cadeia no núcleo do reator é cessada, como no trip do reator, o calor gerado no núcleo diminui significativamente, mas não é interrompido completamente. Os produtos de fissão do urânio, por exemplo, continuam a emitir radiação, que é absorvida pelos materiais presentes no núcleo, gerando calor de decaimento (podendo chegar a 7% da potência do núcleo imediatamente após o trip, e baixando para até 1% após duas horas – em uma usina como Angra 2, seriam 36 MWt de calor residual depois de duas horas).
Esse calor, em situações normais de operação, deve ser removido do circuito primário por meio de algum sistema de refrigeração, ou os combustíveis podem sobreaquecer. No caso do acidente de TMI, a retirada do calor residual do núcleo desligado de seu reator foi principalmente prejudicada pelo vazamento do refrigerante através da válvula de alívio defeituosa. O inventário de água presente no circuito primário baixou para um nível em que não era mais possível realizar a retirada do calor residual, levando ao descobrimento do núcleo, fazendo com que o calor acumulado nos elementos combustíveis levasse ao seu derretimento. (2 pontos)

7ª QUESTÃO (8 pontos)

a) O DNBR representa a distância que as condições de escoamento do refrigerante em dado subcanal estão da ebulição nucleada, fenômeno que diminui o coeficiente de transferência de calor do combustível para o refrigerante. Caso ocorra essa diminuição do coeficiente de transferência de calor (e não sejam tomadas medidas corretivas), ocorre a formação um filme isolante de vapor ao redor da vareta de combustível, degradando ainda mais as condições de transferência de calor entre o combustível e o refrigerante, o que no limite pode levar ao derretimento do combustível por falha na remoção de calor do núcleo. (2 pontos)

b)

(i) Calcular diâmetro hidráulico (Dh): fómula direta $Dh = d[\frac{4}{\pi}(\frac{p}{d})^2 - 1]$

ou calculando $Dh = 4A/P$ (onde A é a área e P é o perímetro molhado). $A = p^2 - \pi d^2/4$ e $P = \pi d$. Dh = 1,866 cm ou 1,87E-02 m.

Em sequência, calcular *h* utilizando a correlação dada pela questão:

$\mathrm{Nu} = \mathrm{hDh/k} \rightarrow \mathrm{h} = \mathrm{k\,Nu/Dh}$, logo h= 26.229,95 W/m²°C ou 26,23 kW/m²°C. (3 pontos)

(ii) Se a taxa de calor superficial é expressa pela equação $\mathrm{q''} = \mathrm{h(T_c - T_w)}$, então sua taxa de calor linear será expressa por $\mathrm{q'} = 2\pi(\frac{\mathrm{d}}{2})\mathrm{h(T_c - T_w)}$.

Logo, $\mathrm{T_w} = \mathrm{T_c} - \mathrm{q'}/[2\pi(\mathrm{d}/2)\mathrm{h}]$, fazendo com que Tw= 313,58 °C. (3 pontos)

8ª QUESTÃO (8 pontos)

a) Das três opções fornecidas ao técnico, apenas o detector de germânio apresenta característica de identificação da energia da radiação.
O TLD apresenta uma leitura integrada da dose total durante um tempo, logo reconhecer o conteúdo de cada frasco só seria possível caso o técnico soubesse qual a energia, meia vida, e a quantidade de materiais radiativos em cada frasco (e se suas doses durante o tempo medido fossem diferentes além da incerteza associada a esse medidor).
Já o contador GM não discerne a energia da radiação incidente, sendo portanto impossível discernir em quantidades identificadas qual elemento está em qual frasco.
Como os dois elementos são emissores gama, o técnico deve analisar separadamente o conteúdo dos dois frascos no detector de HPGe para identificar a energia de emissão de cada um deles, conseguindo, portanto, identificar o seu conteúdo. (3 pontos)

b) Antes de iniciar a operação, teremos 90 ml e 4,521 g (m_{Cs}) de Cs-137 no Frasco A e 90 ml e 1,330 g (m_{Ba}) no Frasco B. Na primeira operação, teremos 80 ml e 8/9 de m_{Cs} no Frasco A e 100 ml com m_{Ba} + 1/9 de m_{Cs} no Frasco B. Na segunda operação, teremos 90 ml com 9/10 de m_{Ba} + 1/10 de m_{Cs} no Frasco B, logo teremos 90 ml com 9/10 de m_{Cs} + 1/10 de m_{Ba} no Frasco A.
A Atividade, por definição, é igual ao número de átomos multiplicado pela constante de decaimento do elemento. O número de átomos se dá pelo número de mols multiplicado pela constante de Avogrado. A constante de decaimento, por sua vez, é igual ao logaritmo neperiano de 2 multiplicado pelo inverso do tempo de meia vida. Portanto, teremos:

Atividade no Frasco A:
$$\frac{9m_{Cs}}{10}\frac{N_A}{M_{Cs}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Cs}}+\frac{m_{Ba}}{10}\frac{N_A}{M_{Ba}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Ba}}$$

Atividade no Frasco B:
$$\frac{9m_{Ba}}{10}\frac{N_A}{M_{Ba}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Ba}}+\frac{m_{Cs}}{10}\frac{N_A}{M_{Cs}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Cs}}$$

A razão da Atividade entre os dois frascos será:
$$\frac{Atividade(Frasco\ A)}{Atividade(Frasco\ B)}=\frac{\frac{9m_{Ba}}{T_{1/2}^{Ba}M_{Ba}}+\frac{m_{Cs}}{T_{1/2}^{Cs}M_{Cs}}}{\frac{m_{Ba}}{T_{1/2}^{Ba}M_{Ba}}+\frac{9m_{Cs}}{T_{1/2}^{Cs}M_{Cs}}}$$

Desenvolvendo a expressão utilizando os valores fornecidos pela questão, vemos que a razão entre as atividades será igual a 1. Portanto, os dois frascos apresentam a mesma atividade.

Caso o candidato aplique inicialmente o desenvolvimento numérico, tem-se:
Atividade no Frasco A: $\frac{9m_{Cs}}{10}\frac{N_A}{M_{Cs}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Cs}}+\frac{m_{Ba}}{10}\frac{N_A}{M_{Ba}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Ba}}$ => $N_A ln2\left(\frac{9*4,521}{10}\frac{1}{137}\frac{1}{33*365*24*3600}+\frac{1,330}{10}\frac{1}{133}\frac{1}{10*365*24*3600}\right)$ => $\frac{N_A ln2}{365*24*3600}\left(\frac{9*4,521}{10}\frac{1}{137}\frac{1}{33}+\frac{1,330}{10}\frac{1}{133}\frac{1}{10}\right)$ => $\frac{N_A ln2}{365*24*3600}(9*10^{-4}+10^{-4})=\frac{N_A ln2}{365*24*3600}*10^{-3}$
Atividade no Frasco B: $\frac{9m_{Ba}}{10}\frac{N_A}{M_{Ba}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Ba}}+\frac{m_{Cs}}{10}\frac{N_A}{M_{Cs}}\frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Cs}}$ => $\frac{N_A ln2}{365*24*3600}\left(\frac{9m_{Ba}}{10}\frac{1}{M_{Ba}}\frac{1}{10}+\frac{m_{Cs}}{10}\frac{1}{M_{Cs}}\frac{1}{33}\right)=\frac{N_A ln2}{365*24*3600}\left(\frac{9*1,330}{10}\frac{1}{133}\frac{1}{10}+\frac{4,521}{10}\frac{1}{137}\frac{1}{33}\right)=\frac{N_A ln2}{365*24*3600}*10^{-3}$

Fica evidente que o candidato deve encontrar o mesmo resultado. (3 pontos)

c) Os contadores Geiger-Muller são formados por uma câmara de ionização com um gás inerte em seu interior, submetido a uma certa voltagem. A radiação ionizante, quando atinge uma molécula do gás no interior da câmara de ionização do contador, retira um elétron dessa molécula. A voltagem aplicada no gás faz com que esse elétron ejetado seja atraído em direção ao catodo com tal energia que ioniza moléculas que se encontram em seu caminho. Essa reação em cadeia gera uma "avalanche" de elétrons em direção ao catodo, constituindo um pulso. A voltagem aplicada se encontra na região de operação denominada Geiger-Muller. Essa voltagem possui a propriedade de saturar o pulso de elétrons para quaisquer ionizações que ocorram no gás, independentemente de sua energia. Isso significa que não há distinção de energia para cada contagem, somente um sinal de que uma molécula foi ionizada em seu interior. (2 pontos)

9ª QUESTÃO (8 pontos)

a)

Fase 1- Fase da mortalidade infantil: taxa de falha é decrescente a medida que os defeitos de fabricação e instalação aparecem (1 ponto)

Fase 2- Fase de vida útil: taxa de falha constante, durante a vida útil do equipamento, dependência de falhas aleatórias (1 ponto)

Fase 3- Fase de envelhecimento: taxa de falha crescente na medida em que o equipamento se desgasta e envelhece (1 ponto)

b) A confiabilidade de um componente é dada pela probabilidade de que ele esteja funcionando até o tempo *t* da missão. Para uma taxa de falha λ constante no tempo, a probabilidade de funcionamento do componente até o tempo t é exponencial, dada pela fórmula

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Para equipamentos idênticos em paralelo, como no caso dos componentes A, B e C, a confiabilidade do conjunto é dada pela probabilidade de que <u>pelo menos um</u> dos componentes esteja funcionando durante a missão. Em outras palavras, a confiabilidade do conjunto de componentes em paralelo pode ser dada pelo complementar da probabilidade de que os três componentes não estejam funcionando no tempo t:

$$R_{ABC}(t) = 1 - [1 - R_A(t)][1 - R_B(t)][1 - R_C(t)]$$

Considerando que A, B e C são idênticos:

$$R_{ABC}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^3$$

Analogamente, teremos para D e E:

$$R_{DE}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2$$

Para equipamentos ou conjuntos em série, a taxa de falha é dada pelo produtório das confiabilidades, pois a probabilidade de funcionamento de uma série dependerá do funcionamento de <u>todos</u> os componentes da série. Logo, para essa configuração, teremos

$$R_{Total}(t) = R_{ABC}(t) * R_{DE}(t)$$

$$R_{Total}(t) = \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^3\right]\left[1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^2\right]$$

ou qualquer desenvolvimento dessa expressão. (5 pontos)

10ª QUESTÃO (8 pontos)

a) O conceito de Defesa em Profundidade na segurança nuclear consiste na existência de diversas barreiras de proteção independentes contra a ocorrência e progressão de acidentes, de tal maneira que, na falha de uma das barreiras, pelo menos uma outra barreira, cuja falha é independente do estado de operação da primeira, estará presente. Os exemplos de aplicação da DiD na segurança nuclear são diversos: no projeto, podemos citar a aplicação efetiva da garantia da qualidade, a aplicação de barreiras físicas independentes contra a liberação de radiação, a redundância de sistemas de segurança na planta, e a aplicação de hipóteses conservadoras durante o dimensionamento de sistemas de segurança. Nos procedimentos operacionais, podemos citar o treinamento de operadores e validação de procedimentos operacionais. Nos procedimentos de emergência e de mitigação

de acidentes severos, podemos citar a correta execução do plano de emergência local e os sistemas de monitoração de acidentes. Outros exemplos poderão ser citados pelos candidatos, e sua correção pode ser avaliada pela banca (PETRANGELI, pgs 115 e 116) (pontos chave: múltiplas barreiras; independência das barreiras; evitar ocorrência e progressão de acidentes; exemplos). (4 pontos)

b) Integridade da pastilha de combustível (1 ponto), integridade do revestimento do combustível (1 ponto), integridade da barreira de pressão do primário (1 ponto), e integridade do sistema da contenção (1 ponto). (PETRANGELI, pg 115)