Atividade Avaliativa - Física de Reatores

Thalles Oliveira Campagnani

1 Exercício 1

1.1 Enunciado

Como é de conhecimento, a equação da difusão de nêutrons em estado estacionário, unidimensional, monoenergética em um meio homogêneo é representada por:

$$-D\nabla^2\varphi(r) + \Sigma_a\varphi(r) = S(r) \tag{01}$$

na qual:

- $\varphi(r)$ é o fluxo de nêutrons na posição r;
- D é o coeficiente de difusão do meio homogêneo;
- Σ_a é a seção de choque macroscópica de absorção; e
- $S(r)$ é o termo fonte que também está em função do fluxo de nêutrons e é dado por:

$$S(r) = \frac{1}{k}\nu\Sigma_f\varphi(r) \tag{02}$$

onde k é o fator de multiplicação efetivo, ν é o número médio de nêutrons produzidos por fissão, e Σ_f é a seção de choque macroscópica de fissão.

Mostre que aplicando *Fórmulas Diferença Finita* centrada de segunda ordem a Equação (01) se obtém a seguinte *Equação de Diferença Finita*:

$$a_1 \cdot \varphi_{i-1} + b \cdot \varphi_i + a_2 \cdot \varphi_{i+1} = S_i \tag{03}$$

sendo

$$a_1 = -\frac{D}{\Delta r^2}\left[1 - \frac{c}{2N}\right], \qquad b = \frac{2D}{\Delta r^2} + \Sigma_a, \qquad a_2 = -\frac{D}{\Delta r^2}\left[1 + \frac{c}{2N}\right], \qquad N = \frac{\Delta r}{r}$$

onde N é o número de segmentos da malha e $c = 0, 1, 2$ para geometria plana, cilíndrica e esférica, respectivamente.

1.2 Dados

Equação da Difusão:

$$-D\nabla^2\phi(r) + \Sigma_a\phi(r) = S(r) \tag{1}$$

tal que

$$S(r) = \frac{1}{k}v\Sigma_f\phi(r) \tag{2}$$

Formulas de diferença:

$$f_{x|i} = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \tag{3}$$

e

$$f_{xx|i} = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\Delta x^2} \tag{4}$$

Laplaciano para o caso unidimensional de coordenadas cartesianas:

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \tag{5}$$

Laplaciano para o caso unidimensional de coordenadas cilíndricas:

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r} \tag{6}$$

Laplaciano para o caso unidimensional de coordenadas esféricas:

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} \tag{7}$$

1.3 Desenvolvimento

1.3.1 Plano

Aplicando o laplaciano para o caso caso cartesiano na equação da difusão e omitindo que os termos estão em função de x, temos que

$$-D\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \Sigma_a \phi = S \tag{8}$$

aplicando as formulas da diferença

$$-D(\frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{\Delta x^2}) + \Sigma_a \phi_i = S_i \tag{9}$$

colocando cada ϕ em evidência

$$(-\frac{D}{\Delta x^2})\phi_{i+1} + (\frac{2D}{\Delta x^2} + \Sigma_a)\phi_i + (-\frac{D}{\Delta x^2})\phi_{i-1} = S_i \tag{10}$$

temos que

$$a_p \phi_{i-1} + b_p \phi_i + c_p \phi_{i+1} = S_i \tag{11}$$

Tal que

$$a_p = \frac{-D}{\Delta x^2} = \frac{-D}{\Delta x^2}(1 - \frac{c}{2N}) \tag{12}$$

e

$$b_p = \frac{2D}{\Delta x^2} + \Sigma_a \tag{13}$$

e

$$c_p = \frac{-D}{\Delta x^2} = \frac{-D}{\Delta x^2}(1 + \frac{c}{2N}) \tag{14}$$

Portanto concluímos que $c = 0$ para o caso plano.

1.3.2 Cilíndrico

Aplicando o laplaciano para o caso caso cilíndrico na equação da difusão e omitindo que os termos estão em função de r, temos que

$$-D(\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial\phi}{\partial r}) + \Sigma_a\phi = S \tag{15}$$

aplicando as formulas da diferença

$$-D(\frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r}\frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta r}) + \Sigma_a\phi_i = S_i \tag{16}$$

colocando cada ϕ em evidência

$$(-\frac{D}{\Delta r^2} - \frac{D}{r\Delta r})\phi_{i+1} + (\frac{2D}{\Delta r^2} + \Sigma_a)\phi_i + (-\frac{D}{\Delta r^2} + \frac{D}{r\Delta r})\phi_{i-1} = S_i \tag{17}$$

temos que

$$a_c\phi_{i-1} + b_c\phi_i + c_c\phi_{i+1} = S_i \tag{18}$$

Tal que

$$a_c = \frac{-D}{\Delta r^2}(1 - \frac{\Delta r}{r}) = \frac{-D}{\Delta x^2}(1 - \frac{c}{2N}) \tag{19}$$

e

$$b_c = \frac{2D}{\Delta r^2} + \Sigma_a \tag{20}$$

e

$$c_c = \frac{-D}{\Delta r^2}(1 + \frac{\Delta r}{r}) = \frac{-D}{\Delta x^2}(1 + \frac{c}{2N}) \tag{21}$$

Portanto concluímos que $c = 2$ para o caso cilíndrico.

1.3.3 Esférico

Aplicando o laplaciano para o caso caso esférico na equação da difusão e omitindo que os termos estão em função de r, temos que

$$-D(\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial r}) + \Sigma_a\phi = S \tag{22}$$

aplicando as formulas da diferença

$$-D(\frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r}\frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta r}) + \Sigma_a\phi_i = S_i \tag{23}$$

colocando cada ϕ em evidência

$$(-\frac{D}{\Delta r^2} - \frac{D}{2r\Delta r})\phi_{i+1} + (\frac{2D}{\Delta r^2} + \Sigma_a)\phi_i + (-\frac{D}{\Delta r^2} + \frac{D}{2r\Delta r})\phi_{i-1} = S_i \tag{24}$$

temos que

$$a_e\phi_{i-1} + b_e\phi_i + c_e\phi_{i+1} = S_i \tag{25}$$

Tal que

$$a_e = \frac{-D}{\Delta r^2}(1 - \frac{\Delta r}{2r}) = \frac{-D}{\Delta x^2}(1 - \frac{c}{2N}) \tag{26}$$

e

$$b_e = \frac{2D}{\Delta r^2} + \Sigma_a \tag{27}$$

e

$$c_e = \frac{-D}{\Delta r^2}(1 + \frac{\Delta r}{2r}) = \frac{-D}{\Delta x^2}(1 + \frac{c}{2N}) \tag{28}$$

Portanto concluímos que $c = 1$ para o caso esférico.

2 Exercício 2

2.1 Enunciado

Uma placa de altura infinita possui espessura de 1,0 cm. Empregado a Equação (03), determine a distribuição do fluxo e o fator de multiplicação do sistema, considerando o meio homogêneo, D =1,0 cm, Σ_a = 1,0 cm^{-1}, $\nu\Sigma_f$ =10,8 cm^{-1} e Δx =1/6. Também considere que não há fugas nem reflexão de nêutrons; isto é $\varphi_0 = \varphi_N = 0$.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Analítico

Calculando N temos que

$$N = \frac{r}{\Delta r} = \frac{1}{\frac{1}{6}} = 6 \tag{29}$$

Iterando a equação (1) de 1 até $N - 1 = 5$, temos

$$\begin{aligned}
i = 1 &\implies a_1\phi_0 + b\phi_1 + a_2\phi_2 = \frac{1}{k}S_1 \\
i = 2 &\implies a_1\phi_1 + b\phi_2 + a_2\phi_3 = \frac{1}{k}S_2 \\
i = 3 &\implies a_1\phi_2 + b\phi_3 + a_2\phi_4 = \frac{1}{k}S_3 \\
i = 4 &\implies a_1\phi_3 + b\phi_4 + a_2\phi_5 = \frac{1}{k}S_4 \\
i = 5 &\implies a_1\phi_4 + b\phi_5 + a_2\phi_6 = \frac{1}{k}S_5
\end{aligned} \tag{30}$$

pelas condições de contorno temos que

$$\phi_0 = \phi_6 = 0 \tag{31}$$

logo

$$\begin{aligned}
i = 1 &\implies b\phi_1 + a_2\phi_2 = \frac{1}{k}S_1 \\
i = 2 &\implies a_1\phi_1 + b\phi_2 + a_2\phi_3 = \frac{1}{k}S_2 \\
i = 3 &\implies a_1\phi_2 + b\phi_3 + a_2\phi_4 = \frac{1}{k}S_3 \\
i = 4 &\implies a_1\phi_3 + b\phi_4 + a_2\phi_5 = \frac{1}{k}S_4 \\
i = 5 &\implies a_1\phi_4 + b\phi_5 = \frac{1}{k}S_5
\end{aligned} \tag{32}$$

Podemos definir

$$\Phi^T = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5] \tag{33}$$

e

$$\mathbf{S}^T = [S_1, S_2, S_3, S_4, S_5] \tag{34}$$

e

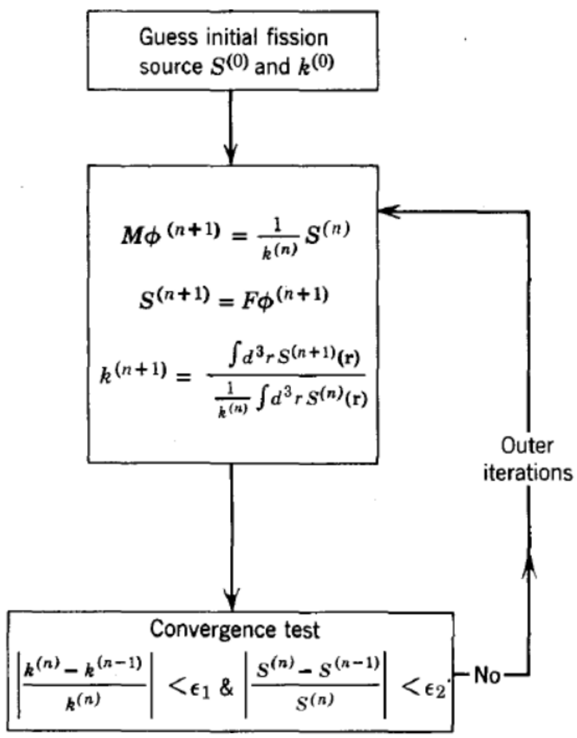
$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} b & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & b & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & b & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & b & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_1 & b \end{pmatrix}$$

Logo o sistema de equações pode ser escrito como a seguinte equação matricial

$$\mathbf{M}\Phi = \frac{1}{k}\mathbf{S} \tag{35}$$

2.2.2 Computacional

A partir do fluxograma abaixo, do dados do enunciado e dos cálculos algébricos que foram realizados, foi desenvolvido um algorítimo para resolver o problema



Código desenvolvido em linguagem MATLAB

```
clear
clc

%Dados
D       =  1.0;   %cm
Sigma_a =  1.0;   % cm1
vSigma_f = 10.8; % cm1
x       =  1;     %cm
dx      =  1/6;   %cm

%Formulas
```

```
N       =  x/dx;
a1      = -D/dx^2;
a2      = a1;
b       = 2*D/dx^2 + Sigma_a;

%Matriz
M = [
     b  a2   0   0   0;
    a1   b  a2   0   0;
     0  a1   b  a2   0;
     0   0  a1   b  a2;
     0   0   0  a1   b;
     ];
%Inversa da matriz
inv_M = inv(M);


% Chute inicial
k=1;
S = [
    1;
    1;
    1;
    1;
    1;
    ];


%Calculo de Phi a partir do chute inicial
phi = inv_M * S / k;

%Dados para loop
i   = 1;    %Variavel auxiliar 1
e   = 2;    %Variavel auxiliar 2
err = 0.001; %Erro mximo (criterio de parada)

%loop
while 1
    i = i + 1; %Primeiro phi j foi calculado, loop comea na segunda interao

    S(:,i) = vSigma_f * phi(:,i-1); %Calcule S

    k(i) = k(i-1) * ( S(1,i) + S(2,i) + S(3,i) + S(4,i) + S(5,i) ) / ( S(1,i-1) + S(2,i-1) + S(3,i-1) +
        S(4,i-1) + S(5,i-1) ); %Calcule K

    phi(:,i) = inv_M * S(:,i-1) / k(i-1); %Calcule phi

    %  Condio   de parada
    if (i>2 && ( abs(k(i) - k(i-e)) < err ) && ( abs(S(1,i) - S(1,i-e)) < err ) && ( abs(S(2,i) -
        S(2,i-e)) < err ) && ( abs(S(3,i) - S(3,i-e)) < err ))
       break;
    end
end
```

2.2.3 Resultado

Executando o loop até que o erro entre uma iteração e outra seja de no máximo 1 centésimo, resultou em um total de 9 interações.
Os valores de k para cada iteração podem ser vistos na tabela abaixo, o qual $i = 1$ é o chute inicial.

k_i	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10
k	1.0000	0.9522	0.9522	1.0051	1.0051	1.0131	1.0131	1.0143	1.0143	1.0144

Os valores de Φ para cada iteração podem ser vistos na tabela abaixo, o qual $i = 1$ é o resultado do chute inicial.

Φ_i	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10
ϕ_1	0.0633	0.0633	0.0630	0.0630	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629
ϕ_2	0.1006	0.1006	0.1078	0.1078	0.1088	0.1088	0.1090	0.1090	0.1090	0.1090
ϕ_3	0.1129	0.1129	0.1238	0.1238	0.1255	0.1255	0.1258	0.1258	0.1258	0.1258
ϕ_4	0.1006	0.1006	0.1078	0.1078	0.1088	0.1088	0.1090	0.1090	0.1090	0.1090
ϕ_5	0.0633	0.0633	0.0630	0.0630	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629

3 Exercício 3

3.1 Enunciado

Uma esfera constituída unicamente de ^{239}Pu possui densidade de 14,4 g· cm^{-3}.

(a) Usando os dados informados na tabela abaixo, calcule o raio e a massa crítica dessa esfera.

(b) A partir do raio calculado e considerando o meio homogêneo, determine a distribuição do fluxo de nêutrons e o fator de multiplicação usando a Equação (03). Nesse caso, empregue a simetria do sistema, impondo Δr =1/5 e supondo que não haja fugas de nêutrons da esfera, isto é $\varphi_N = 0$.

(c) Verifique se o valor do fator de multiplicação imposto em (a) é igual ao calculado em (b). Explique.

Dados:				
A (g/mol)	**ν**	**σ_f (b)**	**σ_γ (b)**	**σ_{tr} (b)**
239.05	2.98	1.85	0.26	6.80

3.2 Desenvolvimento Letra A

Considerando a teoria da difusão para um único grupo de energia, temos que

$$k = \frac{v\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}}{1 + L^2 B_g^2} \tag{36}$$

podemos considerar também as seguintes relações

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}; \qquad D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}}; \qquad B_g^2 = (\frac{\pi^2}{R})^2 \tag{37}$$

dado que estamos querendo encontrar o raio que torna a esfera crítica, podemos substituir $k = 1$ na Eq. 36 e as relações da Eq. 37 a fim de encontrar o raio R

$$\frac{v\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}}{1 + \frac{1}{3\Sigma_{tr}\Sigma_a}\frac{\pi^2}{\tilde{R}^2}} = 1 \tag{38}$$

realizando algumas álgebras em prol de isolar $\tilde{R}$

$$v\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} = 1 + \frac{1}{3\Sigma_{tr}\Sigma_a}\frac{\pi^2}{\tilde{R}^2} \tag{39}$$

$$v\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} - 1 = \frac{1}{3\Sigma_{tr}\Sigma_a}\frac{\pi^2}{\tilde{R}^2} \tag{40}$$

$$3\Sigma_{tr}\Sigma_a\tilde{R}^2 = \frac{\pi^2}{v\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} - 1} \tag{41}$$

$$\tilde{R}^2 = \frac{\pi^2}{3\Sigma_{tr}\Sigma_a(v\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} - 1)} = \frac{\pi^2}{3\Sigma_{tr}(v\Sigma_f - \Sigma_a)} \tag{42}$$

chegamos a

$$\tilde{R} = \frac{\pi}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{1}{\Sigma_{tr}(v\Sigma_f - \Sigma_a)}} \tag{43}$$

Podemos também considerar a relação entre seção de choque macroscópica e microscópica

$$\Sigma_i = N\sigma_i \tag{44}$$

como a esfera é constituída unicamente de um material, temos que

$$\tilde{R} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{N\sigma_{tr}(vN\sigma_f - N\sigma_a)}} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{1}{N\sqrt{\sigma_{tr}(v\sigma_f - \sigma_a)}} \tag{45}$$

considerando a relação entre $\tilde{R}$ e R

$$\tilde{R} = R + a; \quad a = 0,71\lambda_{tr}; \quad \lambda_{tr} = \frac{1}{\Sigma_{tr}} \quad \Longrightarrow \quad R = \tilde{R} - \frac{0,71}{N\sigma_{tr}} \tag{46}$$

temos que

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{1}{N\sqrt{\sigma_{tr}(v\sigma_f - \sigma_a)}} - \frac{0,71}{N\sigma_{tr}} \tag{47}$$

Considerando que

$$N = \frac{\rho N_a}{M} \tag{48}$$

e

$$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma \tag{49}$$

Calculando R com os dados oferecidos na tabela, temos que

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{1}{\frac{14,4*6,022*10^{23}}{239,05}\sqrt{6,8*10^{-24}(2,98*1,85*10^{-24} - (0,26+1,85)*10^{-24})}} - \frac{0,71}{\frac{14,4*6,022*10^{23}}{239,05}6,8*10^{-24}} \tag{50}$$

logo

$$\begin{aligned} R &= 7,5159cm \\ \tilde{R} &= 10,3942cm \end{aligned} \tag{51}$$

3.3 Desenvolvimento Letra B

3.3.1 Analítico

Iterando a equação (1) de 0 até $N-1=4$, temos

$$\begin{aligned} i=0 &\Longrightarrow a_1\phi_{-1} + b\phi_0 + a_2\phi_1 = \frac{1}{k}S_0 \\ i=1 &\Longrightarrow a_1\phi_0 + b\phi_1 + a_2\phi_2 = \frac{1}{k}S_1 \\ i=2 &\Longrightarrow a_1\phi_1 + b\phi_2 + a_2\phi_3 = \frac{1}{k}S_2 \\ i=3 &\Longrightarrow a_1\phi_2 + b\phi_3 + a_2\phi_4 = \frac{1}{k}S_3 \\ i=4 &\Longrightarrow a_1\phi_3 + b\phi_4 + a_2\phi_5 = \frac{1}{k}S_4 \end{aligned}$$

pelas condições de contorno temos que

$$\phi_5 = 0 \tag{52}$$

e

$$\phi_{-1} = \phi_1 \tag{53}$$

logo

$$\begin{aligned}
i = 0 &\implies b\phi_0 + (a_1 + a_2)\phi_1 = \frac{1}{k}S_0 \\
i = 1 &\implies a_1\phi_0 + b\phi_1 + a_2\phi_2 = \frac{1}{k}S_1 \\
i = 2 &\implies a_1\phi_1 + b\phi_2 + a_2\phi_3 = \frac{1}{k}S_2 \\
i = 3 &\implies a_1\phi_2 + b\phi_3 + a_2\phi_4 = \frac{1}{k}S_3 \\
i = 4 &\implies a_1\phi_3 + b\phi_4 = \frac{1}{k}S_4
\end{aligned}$$

Podemos definir

$$\Phi^T = [\phi_0, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4] \tag{54}$$

e

$$\mathbf{S}^T = [S_0, S_1, S_2, S_3, S_4] \tag{55}$$

e

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} b & a_1 + a_2 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & b & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & b & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & b & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_1 & b \end{pmatrix}$$

Logo o sistema de equações pode ser escrito como a seguinte equação matricial

$$\mathbf{M}\Phi = \frac{1}{k}\mathbf{S} \tag{56}$$

3.3.2 Computacional

A partir do fluxograma já citado, foi desenvolvido o seguinte código em linguagem MATLAB

```
clear
clc

%Dados
dens    = 14.4*6.022*10^23/239.05; %densidade
D       = 1/(3*dens*6.8*10^-24); %cm
Sigma_a = dens*(0.26+1.85)*10^-24; %cm1
vSigma_f = 2.98*dens*1.85*10^-24; % cm1
r = 7.5159;%cm
N = 5;

%Formulas
dr = r/N;
a1 = -D/dr^2 * (1 - 1/(2*N));
a2 = -D/dr^2 * (1 + 1/(2*N));
b  = 2*D/dr^2 + Sigma_a;

%Matriz
M = [
     b  (a1+a2)   0   0   0;
    a1   b  a2   0   0;
```

```
     0  a1   b  a2   0;
     0   0  a1   b  a2;
     0   0   0  a1   b;
     ];
%Inversa da matriz
inv_M = inv(M);


% Chute inicial
k=1;
S = [
    1;
    1;
    1;
    1;
    1;
    ];


%Calculo de Phi a partir do chute inicial
phi = inv_M * S / k;

%Dados para loop
i   = 1;    %Variavel auxiliar 1
e   = 2;    %Variavel auxiliar 2
err = 0.005; %Erro mximo (criterio de parada)

%loop
while 1
    i = i + 1; %Primeiro phi j foi calculado, loop comea na segunda interao

    S(:,i) = vSigma_f * phi(:,i-1); %Calcule S

    k(i) = k(i-1) * ( S(1,i) + S(2,i) + S(3,i) + S(4,i) + S(5,i) ) / ( S(1,i-1) + S(2,i-1) + S(3,i-1) +
        S(4,i-1) + S(5,i-1) ); %Calcule K

    phi(:,i) = inv_M * S(:,i-1) / k(i-1); %Calcule phi

    % Condio  de parada
    if (i>2 && (  abs(k(i) - k(i-e)) < err ) && (  abs(S(1,i) - S(1,i-e)) < err ) && ( abs(S(2,i) -
        S(2,i-e)) < err ) && ( abs(S(3,i) - S(3,i-e)) < err ))
       break;
    end
end
```

3.3.3 Resultado

Executando o loop até que o erro entre uma iteração e outra seja de no máximo 5 centésimos, resultou em um total de 9 interações.
Os valores de k para cada iteração podem ser vistos na tabela abaixo, o qual $i = 1$ é o chute inicial.

k_i	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10
k	1.0000	1.2006	1.2006	1.2378	1.2378	1.2416	1.2416	1.2418	1.2418	1.2417

Os valores de Φ para cada iteração podem ser vistos na tabela abaixo, o qual $i = 1$ é o resultado do chute inicial.

Φ_i	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10
ϕ_1	7.8534	7.8534	8.7327	8.7327	8.9504	8.9504	9.0063	9.0063	9.0211	9.0211
ϕ_2	7.5200	7.5200	8.1978	8.1978	8.3436	8.3436	8.3773	8.3773	8.3857	8.3857
ϕ_3	6.6020	6.6020	6.8098	6.8098	6.8047	6.8047	6.7946	6.7946	6.7907	6.7907
ϕ_4	5.0989	5.0989	4.7948	4.7948	4.6648	4.6648	4.6241	4.6241	4.6124	4.6124
ϕ_5	2.9423	2.9423	2.4130	2.4130	2.2793	2.2793	2.2442	2.2442	2.2347	2.2347

3.4 Letra C

Não é igual. Valor de k na letra 'A' é igual a 1, enquanto foi encontrado na letra 'B' o valor de k é igual a $1,2417$. Isso se deve ao fato que na letra 'A' foi considerada fuga de nêutrons, enquanto na letra 'B' foi considerada que a fuga é nula.