

Dosimetria, Protecção Radiológica e Radiobiologia.

Exercícios.

Pedro Teles

2021/2022

1 Introdução. Grandezas radiométricas, dosimétricas, de protecção, e operacionais.

1. (*Attix, 1986, Capítulo 1, exercício 5*) Uma fonte de ^{60}Co emite sobretudo gamas de energias $E_1 = 1,17 \text{ MeV}$ e $E_2 = 1,33 \text{ MeV}$ com igual probabilidade (ignore as outras emissões). Num determinado ponto, o fluxo desta fonte é de $5,7 \times 10^9 \text{ fotões/cm}^2 \cdot \text{s}$. Qual é:
 - a. O fluxo energético total?
 - b. A fluência energética total ao fim de 24 horas?
 - c. A fluência energética dos fotões de 1,17 MeV ao fim de 24 horas?
2. Uma fonte emite electrões isotropicamente com uma densidade de fluxo de acordo com a seguinte equação:

$$\phi_E(E) = (-E^2 + 6E) \times 10^9 \text{ electrões/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV} (0 \leq E \leq 6\text{MeV}). \quad (1)$$

Determine:

- a. O fluxo total.
 - b. A fluência total ao fim de 24 horas.
 - c. O fluxo energético total.
 - d. A fluência energética total ao fim de 24 horas.
 - e. A fluência energética de 0 até 3 MeV ao fim de 24 horas.
3. para o exercício 1, e sabendo que no ponto em questão, o meio é ar, e que, para estas energias, $\langle \frac{\mu_{tr}}{\rho} \rangle \approx 2.796 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{g}$ e $\langle \frac{\mu_{en}}{\rho} \rangle \approx 2.789 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{g}$, calcule, ao fim de 24 horas:
 - a. O kerma total.

- b. O kerma de colisão e o kerma radiativo.
 - c. Assumindo condições CPE, determine o valor da dose absorvida no ponto.
4. Uma fonte pontual emite isotropicamente no ar fótons monoenergéticos de $E_0 = 2\text{MeV}$ com uma actividade de $A_0 = 3000\text{Bq}$. Considere o tempo de semi-vida muito elevado e calcule, ao fim de 60 segundos, num objeto de área 2 m^2 :
 - a. A fluência energética se o objeto estiver a 2 metros de distância.
 - b. A fluência energética se o objeto estiver a 4 metros de distância.
 - c. Explique a relação que encontrou entre as duas situações.
 - d. Sabendo que $(\frac{\mu_{en}}{\rho}) \approx 2.35 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{g}$, calcule a dose absorvida em qualquer ponto a 10 metros da fonte.
 - e. Escreva uma relação entre a atividade e a dose absorvida em qualquer ponto.
5. (*adaptado de Andreo et al, Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry, 2017, Exercícios 7.3-7.4*) O software Spekcalk foi utilizado para criar um espectro energético de uma fonte de raios-X de 100 kVp (ver figura 5), com incidência eletrónica a 30° num alvo de W, e filtragem de 3,5 mm Al + 3 mm Al de Be, que foi posteriormente dividido em intervalos de 5 keVs, como apresentado na tabela 5. Determine:

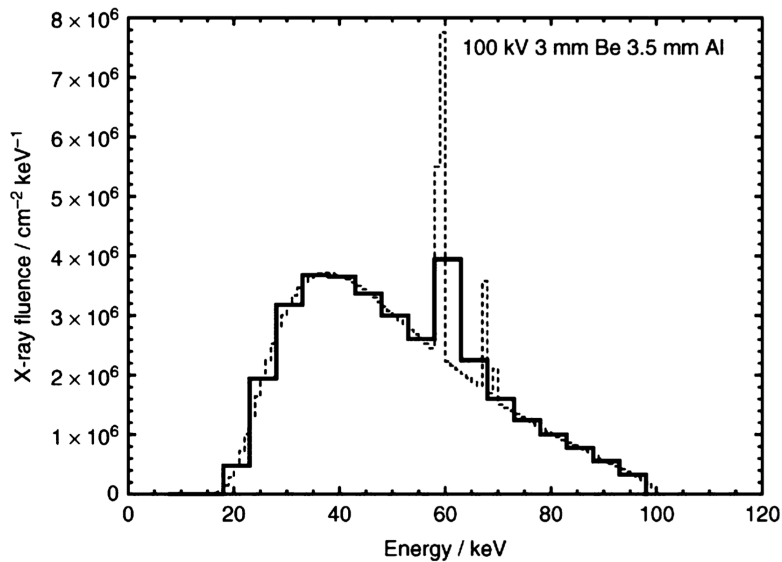


Figura 1: Espectro de energias de uma fonte de raios-X de 100 kVp, com incidência eletrónica a 30° num alvo de W, e e filtragem de 3,5 mm Al + 3 mm Al de Be dividida em intervalos de 1 keV e de 5 keV (*retirado de Andreo et al, 2017*).

- a. A fluência total φ .

- b. A fluência energética diferencial Ψ'_k e a fluência energética total Ψ .
- c. o Kerma diferencial e o Kerma total na água e no ar.
- d. As energias médias ponderadas por fluência, por fluência energética, e por kerma.
- e. Utilizando estas energias médias, e usando as tabelas do NIST, determine o valor da razão entre os coeficientes de absorção mássicos da água e do ar para os três casos.
- f. Determine o valor médio ponderado por fluência, fluência energética, e kerma, dos coeficientes de absorção mássicos da água e do ar e a sua razão, usando as tabelas do NIST. Compare com o resultado anterior.

Intervalo	Energia (keV)	ΔE (keV)	φ'_k keV ⁻¹ cm ⁻¹
1	10	5	2.314×10^{-4}
2	15	5	6.008×10^3
3	20	5	4.784×10^5
4	25	5	1.943×10^6
5	30	5	3.184×10^6
6	35	5	3.683×10^6
7	40	5	3.656×10^6
8	45	5	3.374×10^6
9	50	5	3.001×10^6
10	55	5	2.608×10^6
11	60	5	3.947×10^6
12	65	5	2.252×10^6
13	70	5	1.603×10^6
14	75	5	1.248×10^6
15	80	5	1.005×10^6
16	85	5	7.765×10^5
17	90	5	5.569×10^5
18	95	5	3.305×10^5
19	100	5	0.000×10^0

Tabela 1: Tabela com o espectro da de raios-X explicitada dividido em intervalos de 5 keV.

6. (*adaptado de Attix, 1986, Capítulo 2, exercício 7*) Considere dois recipientes, cheios com água, um com 10 cm³ e outro com 100 cm³. Estes recipientes são irradiados com o mesmo feixe de fótons, o que faz com que o kerma total seja igual a 10 Gy no frasco de menor dimensão.
 - a. Imagine que o feixe tem energia suficiente que pode negligenciar possíveis diferenças na sua atenuação. Qual o kerma no frasco de maior dimensão?
 - b. Determine a energia transferida em cada um dos recipientes.
7. Considere agora o evento particular indicado na figura: um fóton com energia $h\nu_1$ entra num volume V dando origem à sequência de processos indicados. Os fótons $h\nu_4$ e $h\nu_5$ são

fotões de Bremsstrahlung. Os elétrons perdem a totalidade da sua energia cinética no fim das suas trajetórias.

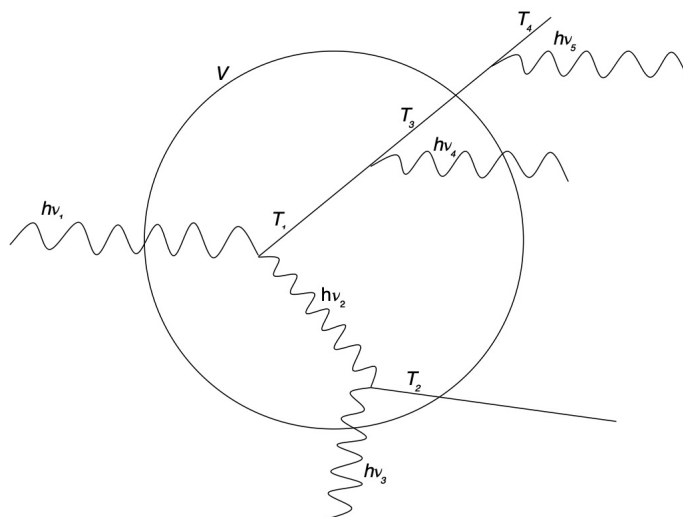


Figura 2: Esquema de interação de um fóton com energia $h\nu_1$ num volume V

- a. calcule a energia transferida, a energia transferida líquida e a energia absorvida no volume.
 - b. Não alterando o esquema de interações, que outro parâmetro alteraria para que a energia transferida líquida fosse equivalente à energia absorvida? Como se chama esta condição?
8. (*adaptado de Attix, 1986, Capítulo 8, exercício 17*) Considere uma folha de alumínio de espessura $0,3 \text{ g/cm}^2$ irradiada perpendicularmente por um feixe de 10^9 elétrons $/\text{cm}^2$, monoenergético, de energia $E=3 \text{ MeV}$? Determine:
- a. O Cema.
 - b. A dose absorvida a partir do Cema.
 - c. Considere agora a expressão para o alcance residual e calcule a dose absorvida a partir desse valor. Compare com o valor que encontrou nas alíneas anteriores e comente.
 - d. Na verdade o caminho dos elétrons é "tortuoso", ou seja, o seu trajeto não se realiza em linha reta, como assumido nas alíneas anteriores. O incremento no caminho

realizado pelos eletrões no caso do alumínio, para a espessura considerada, é de cerca de 10 %. Refaça os cálculos levando em conta este valor.

- e. Finalmente, considerando que a eficácia radiativa dos eletrões pode ser aproximada utilizando:

$$Y(T) \approx \frac{S(E)_{rad}}{S(E)_{coll}} \approx \frac{ZT}{700 + 200 \log_{10}(T/3)}$$

determine de novo a dose absorvida na folha de alumínio e compare todas os valores encontrados até aqui.

9. Uma pessoa é exposta a uma dose de $D=0,5$ mGy devido a fotões e $D=0,5$ mGy devido a partículas alfa. Calcule:
- A dose equivalente devido às duas radiações.
 - A dose efectiva sabendo que a região exposta foi a pele.
10. Num determinado ponto o fluxo de fotões monoenergéticos de $E_0 = 500\text{KeV}$ é de $3,2 \times 10^9$ fotões/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$. Utilizando as tabelas com coeficientes de conversão do ICRP determine:
- Usando o ICRP 74, calcule a dose ambiental $H^*(10)$ no ponto ao fim de 5 horas.
 - Usando o ICRP 74, calcule a dose pessoal $H_p(10)$ e $H_p(0.07)$ no ponto ao fim de 5 horas.

2 Teoria de cavidades. Teoria de Bragg-Gray. Razões de poderes de paragem. Teorema de Fano

1. (*Attix, 1986, Capítulo 10, exercício 1*) Uma região-fronteira entre dois meios diferentes: de carbono e de alumínio, é atravessada por electrões, com uma fluência de $4,10 \times 10^{11} \text{ e/cm}^2$, com uma energia de 12,5 MeV. Ignorando raios- δ e difusão, qual é a dose absorvida D_C no meio de carbono adjacente à interface? Determine ainda a razão de doses $\frac{D_{Al}}{D_C}$.
2. (*Attix, 1986, Capítulo 10, exercício 2*) Uma câmara de ionização consiste numa pequena cavidade de ar com paredes de cobre com uma espessura um pouco superior ao alcance máximo dos electrões. O volume da cavidade é $0,100 \text{ cm}^3$, a densidade do ar é $1,293 \times 10^{-3} \text{ gcm}^{-3}$, e uma determinada exposição a raios- γ gera uma carga de $7,00 \times 10^{-10} \text{ C}$.
 - a. Qual é a dose absorvida média na cavidade de ar?
 - b. Usando a teoria de Bragg-Gray para determinar a dose na parede de cobre, assumindo uma energia média de $\bar{T} = 0,43 \text{ MeV}$ para os electrões.
 - c. Suponha agora que o erro de \bar{T} é de 34% e que deveria ter utilizado o valor de 0,65 MeV. Refaça os cálculos. Qual o desvio na determinação da dose absorvida na parede de Cobre D_{Cu} .
3. (*Attix, 1986, Capítulo 10, exercício 4*) Assuma que duas câmaras de ionização são cavidades B-G, e estão cheias com ar. As câmaras são idênticas excepto no facto de que uma é de alumínio e a outra de grafite. As paredes são mais espessas que o alcance máximo dos electrões secundários no caso de fotões de 1 MeV, que são atenuados marginalmente. Calcule a razão aproximada da carga gerada nas duas câmaras.
4. (*Johns & Cunningham, 1991, Capítulo 7, exemplo 7-4*) Suponha-se uma câmara de ionização de carbono com uma cavidade de 1 cm^3 de ar que é colocada num fantoma de água e exposta a raios gama de ^{60}Co , que produzem uma carga de $Q = 3 \times 10^{-8} \text{ C}$. Assumindo que as paredes de carbono são mais espessas que o alcance dos electrões secundários, determine a dose na água.
5. (*Johns & Cunningham, 1991, Capítulo 7, exercício 8*) Uma pequena câmara de carbono com volume de $0,1 \text{ cm}^3$ de ar é colocada em tecido muscular (Muscle, Skeletal, ICRU-44), e uma carga de $6,67 \times 10^{-9} \text{ C}$. Usando as tabelas do NIST, determine a dose absorvida no músculo. (Assuma que para um espectro de raios-X, com 270 KVp, 2,7 mm Cu, a energia média ponderada por fluência dos fotões é de $\approx 150 \text{ keV}$).
6. Enuncie o teorema de Fano e a sua importância para a teoria de cavidades.

3 Dosimetria e metrologia de radiações ionizantes.

Estimativa de doses absorvidas. Dosímetros.

1. (*adaptado de Johns&Cunningham, 1991, Capítulo 7, exemplos 7-8 e 7-9*) Assumindo irradiação com uma fonte de ^{60}Co , e usando as tabelas do NIST e do livro Johns&Cunningham (apêndice páginas 723 em diante), determinar o valor de N_{ar} para as seguintes câmaras de ionização:
 - a. uma câmara com paredes de Bakelite. Considere que $k=0,978$
 - b. uma câmara com paredes de Lucite. Considere que $k=0,981$
2. (*adaptado de Johns&Cunningham, 1991, Capítulo 7, exemplo 7-10*) Calcular a dose absorvida num fantoma de água por um feixe de fótons de 26 MV usando as duas câmaras anteriores, sabendo que mediram um valor de 87,0 e sabendo que $N_x = 2,85 \times 10^{-4} \text{ X}$ por unidade de medição. Use novamente as tabelas do NIST e do livro Johns&Cunningham (apêndice páginas 723 em diante).
3. (*adaptado de Johns&Cunningham, 1991, Capítulo 7, exercício 7.14*) Uma câmara de ionização com paredes de alumínio é utilizada para medir a dose absorvida num fantoma de água irradiado com 10 MV de fótons de um acelerador linear. Um factor de calibração usando ^{60}Co foi obtido com um valor de $N_x = 2,66 \times 10^{-4} \text{ X}$. A leitura na câmara de ionização foi de 143. Considerando um valor de $k=0,985$ e usando as tabelas do NIST e do livro Johns&Cunningham (apêndice páginas 723 em diante) determine o valor da dose absorvida na água.
4. (*adaptado de Andreo et al, Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry, 2017, Exercício 2*) Faça um gráfico da dependência energética de um detetor "grande" por unidade de dose (resposta do detetor) em relação a uma fonte de ^{60}Co imaginando um detetor de carbono, LiF(TLD) , e PMMA (Lucite).

4 Dosimetria em radiologia e radioterapia.

4.1 Radioterapia

1. Faça uma estimativa do valor de k_{Q,Q_0} para um linac da Varian de 10 MeV (fotões). Compare com o valor determinado por Monte Carlo $k_{Q,Q_0} \approx 0,9895$ numa câmara NE2571. Compare com os valores que se obteriam em várias câmaras sabendo que o valor de $TPR_{20,10}$ é de ≈ 0.740 .
2. imagine que fez todas as medidas necessárias, seguido as recomendações do TRS 398, de forma correta, e determinou um valor de $TPR_{20,10} = 0,670$. Na câmara de ionização fez uma medição de $M=5,018$. O valor de referência era de $N_{D_w} = 0,985 \text{ Gy}^{-1}$. Ignorando as perturbações, determine a dose na água usando as tabelas do TRS 398, se realizou as medidas utilizando:
 - a. uma câmara de ionização NE 2571.
 - b. uma câmara de ionização PTW 30001.
 - c. uma câmara de ionização Exradin A12.
3. Um feixe de eletrões com um valor medido de $R_{50} = 5,96 \text{ gcm}^{-2}$, que corresponde a um acelerador de 20 MeV, é submetido a uma calibração usando uma câmara de ionização previamente calibrada num acelerador de 5 MeV ($R_{50} = 1,75 \text{ gcm}^{-2}$). O valor medido foi de $M=5,031$ e o valor de $N_{D_{Q_{cross}}}$ é de $0,999 \text{ Gy}^{-1}$. Determine o valor da dose na água.
 - a. Usando as tabelas das páginas 83 e 84 do IAEA TRS 398, estime o valor de $k_{Q_{cross},Q_{int}}$ para uma câmara de ionização, calcule também o valor de $z_{cross_{ref}}$. Comece por determinar o valor de $_m S_{ar}^{gua}$, para o valor Q_{int} de referência ou seja para $R_{50} = 7,5 \text{ gcm}^{-2}$. Em seguida calcule o valor de $_m S_{ar}^{gua}$ para $R_{50} = 1,75 \text{ gcm}^{-2}$.
 - b. Usando as tabelas das páginas 83 e 84 do IAEA TRS 398, estime o valor de $k_{Q,Q_{int}}$ para uma câmara de ionização, calcule também o valor de z_{ref} . Use o valor de $_m S_{ar}^{gua}$, para o valor Q_{int} de referência determinado na alínea anterior. Em seguida calcule o valor de $_m S_{ar}^{gua}$ para $R_{50} = 5,95 \text{ gcm}^{-2}$.
 - c. Use a expressão para determinar o valor da dose na água, ignorando as perturbações. Compare os valores anteriores com os valores tabelados.
4. Determine o valor de k_Q para o mesmo feixe usando a expressão DIN 6800-2 não aplicando a correcção para C.I. cilíndricas, ou seja $k_Q = 1,106 - 0,1312 R_{50}^{0,214}$. Para este valor, e considerando que tinha medido o mesmo valor de M , para um $N_{D_w} = 0,989$, determine o valor de dose na água.

4.2 Radiologia

1. Estime o valor de IAK para um exame de raios-X do tórax em que mediu previamente um output para o feixe de raios-X a uma distância de $d=100$ cm de $0,1$ mGy.
 - a. Para uma distância entre o foco e o paciente de 150 cm e um valor de 60 mAs.
 - b. Para uma distância entre o foco e o paciente de 120 cm e um valor de 90 mAs.
2. Usando a tabela 22.3 da página 577 do livro Diagnostic Radiology Physics estime o valor para a dose efectiva nos pulmões para os dois casos.
3. Um paciente adulto realizou um exame de TAC do abdómen para um pitch de $0,9$ e um varrimento de 28 cm. O aparelho tinha sido previamente calibrado para aquelas condições com os valores de $CTDI_{PMMA,c} = 7,3$ mGy e de $CTDI_{PMMA,a} = 7,0$ mGy. Faça uma estimativa da dose efectiva no abdómen utilizando o AAPM report 96.
 - a. Comece por calcular o valor de $CTDI_{vol}$. Com este valor determine o valor de DLP.
 - b. Utilize a tabela 3 do relatório para fazer uma estimativa da dose efectiva.
4. Calibrou-se um mamógrafo com um fantoma de 45 mm PMMA. Obtendo-se um valor de IAK de $0,950$ mGy para um HVL de $0,45$ mm Al, e espectro de Mo/Mo.
 - a. Determine o valor de MGD (Mean Glandular Dose) usando as tabelas do IAEA-HHS-2
 - b. Usando as tabelas de Dance *et al*, determine o valor que iria obter para um seio de espessura de 3 cm para mesma qualidade de feixe mas usando um espectro de W/Rh
 - c. Repita os cálculos para um seio de 6 cm numa qualidade de feixe de HVL $0,3$ mm Al e um espectro de Mo/Rh.

5 Dosimetria em medicina nuclear.

1. (*exemplo 22-1, livro Physics in Nuclear Medicine, Cherry et al*) Qual é a atividade acumulada no fígado para uma injeção de 100 MBq de um colóide sulfúrico marcado com ^{99m}Tc , assumindo que 60% da substância é retida indefinidamente no fígado?
2. (*exemplo 22-2, livro Physics in Nuclear Medicine, Cherry et al*) Suponha que um paciente é injetado com 100 MBq de microesferas marcadas com ^{99m}Tc com incorporação instantânea nos pulmões. Qual é a atividade acumulada nos pulmões se 60% da atividade é excretada dos pulmões com meia-vida biológica de 15 minutos e 40% com meia-vida biológica de 30 minutos?
3. (*exemplo 22-3, livro Physics in Nuclear Medicine, Cherry et al*) Suponha que no caso anterior há um defeito metabólico e as meias-vidas biológicas passam a 2 e 3 horas respectivamente. Qual a atividade acumulada neste caso ?
4. (*exemplo 22-4, livro Physics in Nuclear Medicine, Cherry et al*) Um gás radioativo com um tempo de semivida de 20 segundos é injetado em solução intravenosa. O tempo de semi-vida de incorporação é de 30 segundos. O composto é excretado por exalação com um tempo de semi-vida biológico de 10 segundos. Qual é a atividade acumulada nos pulmões para uma injeção de 250 MBq?

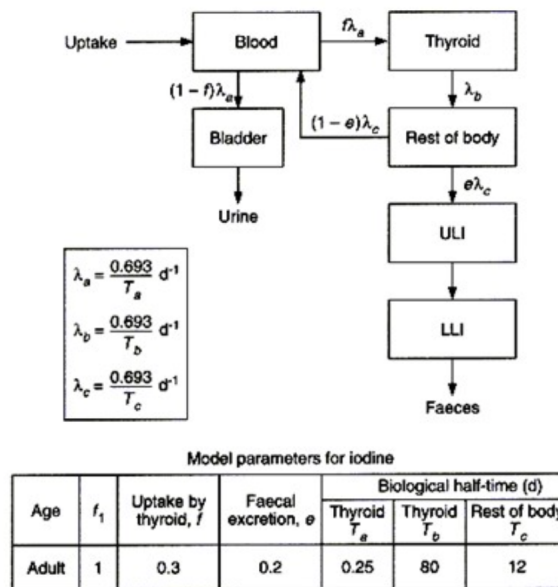


Figura 3: Modelo biocinético do Iodo (ICRP)

5. (*exemplo 22-6, livro Physics in Nuclear Medicine, Cherry et al*) O radionuclídeo referido anteriormente emite partículas β em 100% das suas desintegrações com $\bar{E}_\beta = 0,3\text{MeV}$.

Isto é seguido por uma emissão de 80% de raios γ com 0,2 MeV e 20% de um eletrão de conversão de 0,195 MeV que emite sempre um raio-X característico de 0,005 MeV. Calcule as constantes de dose absorvida para cada emissão

6. (*exemplo 22-7, livro Physics in Nuclear Medicine, Cherry et al*) No exemplo anterior, determine a dose absorvida devido a radiação não penetrante nos pulmões, assumindo que a sua massa é de 1 kg.
7. Na figura 3 mostra-se o modelo biocinético do iodo. Resolva o modelo para o Iodo-131 utilizando um método de Runge-Kutta de segunda ordem.
8. Utilizando as tabelas do ICRP 128 (tabela C.24; página 146) escreva as equações para o modelo biocinético de colóides marcados com ^{99m}Tc num paciente com um metabolismo normal. Confirme os valores de $\frac{\tilde{A}_S}{A_0}$. Se injectar um paciente com 300 MBq deste composto, qual a dose absorvida nos diferentes órgãos?
9. Utilizando as tabelas do ICRP 128 (tabela C.96; página 228) escreva as equações para o modelo biocinético de leucócitos marcados ^{99m}Tc . Confirme os valores de $\frac{\tilde{A}_S}{A_0}$. Se injectar um paciente com 500 MBq deste composto, qual a dose absorvida no baço?

6 Introdução ao cálculo de blindagens de radiação ionizante em radioterapia.

1. Calcule o valor da carga de trabalho (workload - W) semanal para uma sala de radioterapia que trata uma média de 60 doentes por dia, e trabalha 5 dias por semana. O controle de qualidade é realizado semanalmente e o equipamento gasta cerca de 40 Gy para realizar.
2. Calcule a largura necessária para uma barreira primária que se encontre a uma distância $d=300$ cm do alvo.
3. Calcular a atenuação necessária para uma escadaria adjacente ao bunker onde incide o feixe primário do exercício 1. A barreira primária encontra-se a 3 metros do isocentro (que se encontra a 1 metro do alvo).
 - a. Determine o valor de TVLs necessários para blindar adequadamente o feixe.
 - b. Sabendo que o equipamento utilizado usa uma energia de 6 MeV e usando a tabela 4 do IAEA-SRS-47 (página 45) determine a espessura necessária de betão que seria necessária.
 - c. Repita os cálculos usando duas camadas, uma de betão e uma de aço.

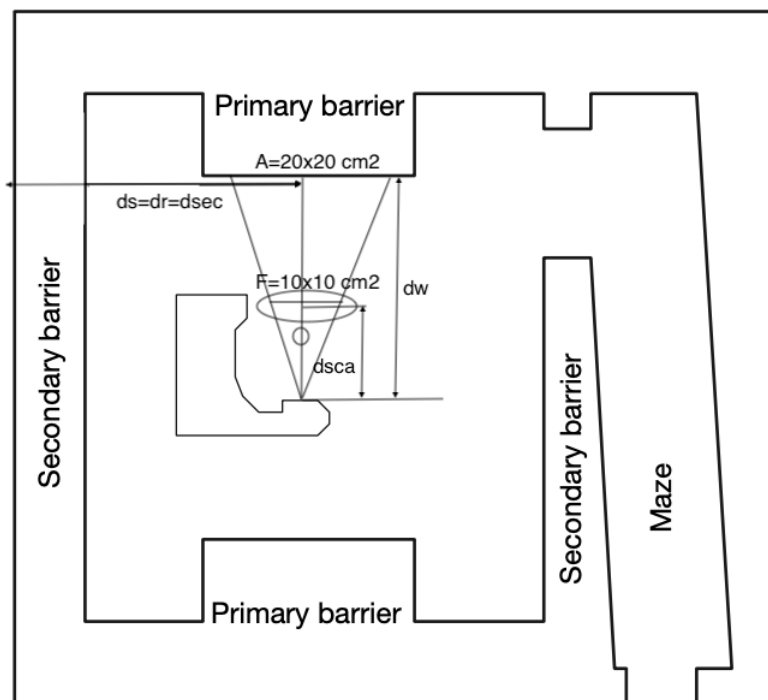


Figura 4: Esquema para o exercício 4

4. Calcule os valores de B_L , de B_P e de B_W para a barreira secundária (ver figura 4), sabendo que esta é adjacente a uma sala de espera. Use os valores da tabela 5 do IAEA-SRS-47 (página 46) para os factores de difusão. Use $d_{sca}=100$ cm, $d_w=200$ cm e $d_s = d_r = d_{sec}=300$ cm.
- Determine o valor de TVLs necessários para blindar adequadamente o feixe nesta barreira devido às 3 contribuições. Use as condições estabelecidas no IAEA SRS 47 para determinar o valor que deve utilizar.
 - Determine a espessura necessária de betão que seria necessária.
 - Repita os cálculos usando duas camadas, uma de betão e uma de aço.

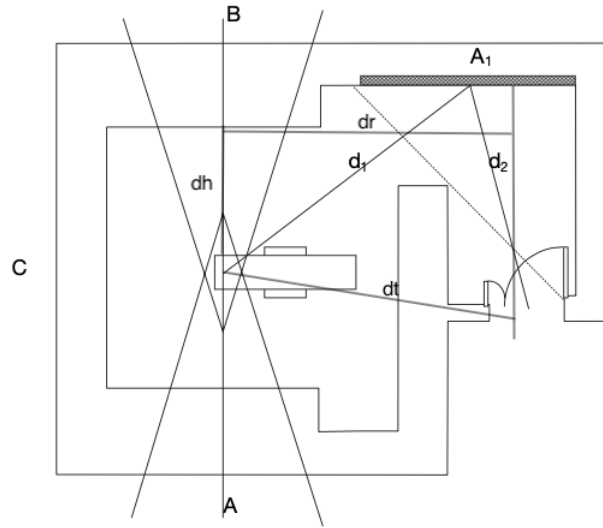


Figura 5: Esquema para o exercício 5

5. Considere a figura 5 de um bunker para uma instalação de ^{60}Co e um $W=1000$ Gy/semana.
- Sabendo que $d_{sca}=1$ m $d_1=6,0$ m e $d_2=4,0$ m, e que $A_1 = 8\text{m}^2$, calcule D_p .
 - Sabendo que $d_H=2$ m, $d_r=3,8$ m, $d_z=2,5$ m, $A_H = 0,4\text{m}^2$ e $A_r = 2,5 \times 1,5\text{m}^2$ determine o valor de D_w
 - Sabendo que $d_i = d_1$, $d_m = d_z$, e que $d_t=5,0$ m determine os valores de D_L e D_T sabendo que $B = 1,06 \times 10^{-4}$
 - calcule o valor de D_d (dose à porta, sem considerar os neutrões)

7 Micro e nanodosimetria

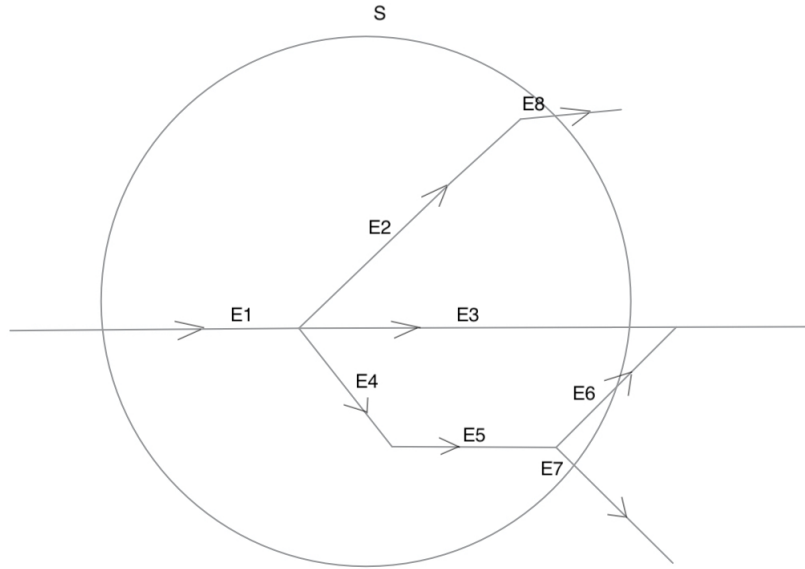


Figura 6: Esquema da distribuição incipiente de transferências energéticas no sítio S.

Considere a figura 6 que representa uma distribuição incipiente de transferências energéticas no sítio S. Sabendo que $E_1=900$ KeV, $E_2=200$ KeV, $E_3=50$ KeV, $E_4=100$ KeV, $E_5=40$ KeV, $E_6=20$ KeV, $E_7=10$ KeV, e $E_8=100$ KeV, determine:

1. A transferência de energia ϵ_i em cada ponto de transferência no sítio S.
2. A energia absorvida ϵ .
3. Sabendo que o volume do sítio S é de $300 \mu\text{m}^3$ e que o material é água, determine o valor da energia específica z_1 em Gy.
4. Calcule o valor da energia lineal y_1 em $\text{keV}/\mu\text{m}$.
5. Sabendo que a densidade de probabilidades da energia específica para uma dose de 100 Gy é dada pela equação $f(z) = e^{-(z-z_1)^2}$ determine o valor da energia específica média \bar{z} e o valor da energia lineal média \bar{y} .
6. Calcule o número médio de eventos que produzem a dose D.

7. Escreva a equação de Poisson para a probabilidade de eventos $p(\nu)$
8. Calcule a probabilidade de sobrevivência de uma célula usando o modelo "multi-hit" considerando que o número de "tiros" necessários para inativar a célula é de 100. Considere que $\gamma = 1,1 \text{ Gy}^{-1}$.
9. Calcule o mesmo valor usando o modelo "multitarget". Considere que o número de alvos é de $m=10$.