

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Monitorização do campo de neutrões produzidos por um LINAC

Pedro Carlos Brízido Reis

Mestrado em Engenharia Física

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Monitorização do campo de neutrões produzidos por um LINAC

Pedro Carlos Brízido Reis
Mestrado em Engenharia Física

Tese orientada pelo Doutor
Daniel Galaviz Redondo

2010

Agradecimentos

A todos os amigos, que tem apoiado este meu projecto, e me têm dado uma ajuda preciosa, ao me fazerem acreditar em cada momento de desanimo, que com convicção tudo é possível.

Para a pessoa, a quem mais este projecto tem causado transtorno, por interferir em demasia nas nossas vidas e expectativas. Por todo o tempo que esperou, de forma paciente manifestando sempre compreensão, e sem nunca mostrar qualquer tipo de exigência, apenas me resta com muito carinho e admiração, roubar um pequeno espaço destes espaço que tanto espaço lhe retirou, para manifestar o mais sinceros dos agradecimentos.

Para todos os membros do ENAPG , uma palavra sincera de agradecimento, pelos muitos e bons momentos de partilha ajuda e formação.

Ao Doutor Daniel, pela ajuda despendida durante a orientação desta tese.

E como não podia deixar de ser, um sincero agradecimento por tudo.... à minha família.

Resumo

Nas últimas décadas, tem-se observado um aumento da utilização do LINAC como fonte de radiação ionizante em ambiente hospitalar, nomeadamente em aplicações como radioterapia e radio-cirurgia. De uma forma geral, poderemos dizer que os avanços em física e em engenharia têm contribuído significativamente, para o aumento da eficiência destas terapias, permitindo a implementação de esquemas radioterapêuticos mais precisos, de forma a depositar-se a dose pretendida no tecido alvo, com minimização de dose nos tecidos saudáveis.

Dada a complexidade dos mecanismos de transporte e deposição de radiação, torna-se necessária uma monitorização eficiente de todas as formas de radiação presentes numa sala de radioterapia, de forma a satisfazer as exigências terapêuticas e os aspectos de radioproteccão.

Tendo em consideração que se tem vindo a utilizar, progressivamente feixes de maior energia (permitindo tratamento mais eficiente em tumores de tecidos profundos), tem se assistido à necessidade de monitorizar o campo de neutrões gerados em foto-reacções nucleares. Assim com este trabalho pretende-se optimizar uma técnica de monitorização de neutrões, tendo como base a espectrometria de Bonner.

Para isso e dado os constrangimentos técnicos, associados ao uso de detectores activos, em espaços com LINAC em funcionamento, será feita pesquisa acerca da possibilidade da utilização de elementos alternativos ao ^{197}Au , que quando utilizados como detectores passivos na espectrometria de Bonner, possibilitem uma monitorização de neutrões que se ajuste às necessidades do espaço de radioterapia.

Conteúdo

Conteúdo	iii
Lista de Figuras	vi
1 Introdução	1
2 Radioterapia, princípios de dosimetria e LINAC	4
2.1 Modos de Radioterapia	5
2.2 Interações da radiação com a matéria	10
2.2.1 Partículas carregadas	11
2.2.1.1 Transferência de energia para partículas pesadas	11
2.2.1.2 Transferência de energia para electrões	12
2.2.1.3 Alcance das partículas carregadas na matéria . .	13
2.2.2 Fótons	13
2.3 Princípios de dosimetria	15
2.3.1 Quantidades utilizadas na caracterização do feixe de radiação	15
2.3.2 Quantidades utilizadas na ponderação de dose e efeito bio- lógico	17
2.3.3 Quantidades utilizadas na ponderação da dose ambiental .	21
2.3.4 Aspectos de radioprotecção numa unidade de radioterapia	23
2.4 LINAC	25
2.4.1 Princípios de funcionamento e radiação produzida por um LINAC de uso clínico	26
2.4.2 Componentes de um LINAC	26

3 Física de neutrões	30
3.1 Propriedades do neutrão	30
3.2 Reacções nucleares induzidas por neutrões	31
3.2.1 Formação do núcleo composto	34
3.2.2 Ressonâncias	35
3.3 Interacção de neutrões com a matéria e processo de moderação de neutrões	36
3.3.1 Moderação de neutrões	37
3.3.1.1 Cinemática da moderação	39
3.4 Produção de neutrões por fotoreacções nucleares	41
3.4.1 Espectro de neutrões obtido no isocentro	42
4 Espectrometria de Bonner	45
4.1 Considerações gerais	46
4.1.1 Função de resposta	47
4.1.2 Processo de desconvolução	48
4.1.2.1 Modos de Espectrometria de Bonner	49
4.1.2.2 Detectores usados em espectrometria de Bonner	51
5 Simulação e análise de dados	54
5.1 Simulação utilizando código Monte Carlo	55
5.2 Virtual Monte Carlo	57
6 Selecção dos elementos alternativos ao ^{197}Au e definição da geometria da amostra	60
6.1 Considerações gerais	61
6.2 Parâmetros utilizados na selecção dos elementos	62
6.2.1 Dados e cálculos utilizados na estimativa da actividade dos elementos	65
6.3 Resultados analíticos e discussão	66
6.4 Processo de activação	71
6.4.1 Activação da amostra quando sujeita a um campo de neutrões	71
6.4.2 Determinação da actividade de saturação	72
6.4.2.1 Determinação da actividade A_0	73

6.5	Definição do volume e geometria da amostra	75
6.5.1	Processo de activação e fluxo neutrónico nas camadas interiores do alvo	75
6.5.2	Definição do volume da amostra	77
6.5.3	Optimização da geometria da amostra	79
6.5.4	Seleção do elemento a utilizar como detector passivo	82
7	Caracterização do espectro de neutrões no isocentro	87
7.1	Simulação sala de radioterapia	89
7.1.1	Componentes do LINAC utilizados para a simulação	91
7.1.2	Definição das condições de simulação	93
7.2	Resultados obtidos e discussão	94
8	Projectos futuros	98
9	Conclusões	100
	Esferas de Bonner	102
	Métodos de activação	115
	Simulação sala de radioterapia	133
	Espectro utilizado nas simulação da actividade	156
	References	159

Lista de Figuras

2.1	Perfil de deposição de dose em profundidade, para fótons	6
2.2	Perfil de deposição de dose em profundidade , para prótons e íons de carbono	8
2.3	Percentagem de dose em profundidade para feixes de prótons de energia distinta em água, destacando-se a sobreposição dos picos de Bragg	9
2.4	Interações dos fótons em função das sua energias, e o número atómico do material	14
2.5	Valores do factor de ponderação w_r para diferentes radiações e energias	21
2.6	Esfera ICRU, com representação do processo de medida da dose ambiental para uma profundidade d	22
2.7	LINAC integrado num equipamento de radioterapia	27
3.1	Secção eficaz de captura de neutrões para o ^{297}Au	33
3.2	Secção eficaz de captura de neutrões para o ^{51}V	33
3.3	Secção eficaz de captura de neutrões para o ^{115}In	34
3.4	Classificação dos neutrões de acordo com a sua energia	37
3.5	Secção eficaz de captura e dispersão de neutrões para o hidrogénio	38
3.6	Secção eficaz de captura e dispersão de neutrões para o carbono .	39
3.7	Produção parcial de neutrões para cada componente do LINAC Simens Primus	42
3.8	Espectros de neutrões obtidos a 50 cm do isocentro para feixes de fótons de distintas energias	43

LISTA DE FIGURAS

4.1	Função de resposta para uma esfera de 8"	48
5.1	Exemplo da historia de um evento simulado com código Monte Carlo	57
6.1	Elementos seleccionado e respectivos parâmetros de ponderação .	64
6.2	Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 2 minuto com fluências características dos pico dos neutrões rápidos no isocentro	67
6.3	Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 4 minutos com fluências características dos pico dos neutrões rápidos no isocentro	67
6.4	Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 2 minutos com fluências características dos pico dos neutrões térmicos no isocentro	68
6.5	Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 4 minutos para fluências características dos pico dos neutrões térmicos no isocentro	68
6.6	Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 2 minutos para fluências características do patamar dos neutrões epitérmicos no isocentro	69
6.7	Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 4 minutos para fluências características do patamar dos neutrões epitérmicos no isocentro	69
6.8	Actividade da amostra durante e após o tempo de irradiação . . .	73
6.9	Factor de auto protecção para diferentes diâmetros e espessuras .	76
6.10	Estimativa do consumo de átomos e factores de autoprotecção para os diferentes elementos e geometrias	79
6.11	Activação do ^{197}Au para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra com geometria esférica	80
6.12	Activação do ^{197}Au para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra definido-se, a folha como geometria	80

LISTA DE FIGURAS

6.13	Activação do ^{115}In para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra com geometria esférica	81
6.14	Activação do ^{115}In para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra, definido-se a folha como geometria	81
6.15	Activação do ^{51}V para um feixe de 400.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra com geometria esférica	81
6.16	Activação do ^{51}V para um feixe de 400.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra, definido-se a folha como geometria	81
6.17	Histograma para a secção da folha com raio inferior a 1,5 cm e superior a 1 cm (exterior) e para neutrões com energia inferior a 2 eV	84
6.18	Histograma para a secção da folha com raio inferior a 0,5 cm (interior) e para neutrões com energia inferior a 2 eV	84
6.19	Histograma para a secção da folha com raio inferior a 1cm e superior a 0,6 cm e par neutrões com energia compreendida entre 2 keV e 2 MeV, com incidência na superfície da folha com orientação para o gerador de partículas	84
6.20	Histograma para a secção da folha com raio inferior a 1cm e superior a 0,6 cm e par neutrões com energia compreendida entre 2 keV e 2 MeV, com incidência na superfície da folha com orientação para o gerador de partículas	84
6.21	Resumo da actividade para os diferentes elementos	85
7.1	Esfera com 8" de diâmetro colocada a 50 cm do isocentro	88
7.2	Conjunta das esferas colocadas na linha que dista 50 cm do isocentro	89
7.3	Dimensões da sala de radioterapia utilizada nas simulação	90
7.4	Constituição química do betão utilizado na simulação	91
7.5	Simulação dos componentes do LINAC	92

LISTA DE FIGURAS

7.6	Visualização da colimação do feixe de fótons produzido pelo LINAC simulado	93
7.7	Histograma com as posições de produção dos neutrões	94
7.8	Espectro de energias dos neutrões gerados (keV)	95
7.9	Distribuição espacial dos neutrões gerados	96
7.10	Posição dos neutrões detectados para a configuração com o conjunto das esferas	97

Capítulo 1

Introdução

Considerando que o problema de contaminação neutrónica, durante sessões de radioterapia externa, com feixe de fótons de energia superior a 8 MeV, se encontra bem documentado [1], o principal desafio desta tese, consiste em efectuar a revisão da espectrometria de Bonner[2], em modo passivo, com a posterior optimização, que permita torná-la mais adequada às exigências de monitorização de neutrões em ambiente de radioterapia.

De uma forma geral, e atendendo aos múltiplos constrangimentos (campos electromagnéticos intensos, e elevada intensidade de fótons), que impedem o uso de detectores activos do sistema multi esfera de Bonner, na monitorização de neutrões em LINAC's¹, é utilizada nestes espaços a espectrometria de Bonner passiva, utilizando-se detectores de activação como as folhas de ^{197}Au .

No entanto e apesar de o ^{197}Au , apresentar uma serie de condições favoráveis como, elevada secção eficaz de captura para neutrões térmicos, e uma boa abundância do fotópico de 411 keV, que facilitam a medida da actividade de saturação, o facto de o núcleo que resulta da sua activação (^{198}Au), apresentar um tempo de semivida de cerca de 2 dias e uma baixa actividade, impede a sua utilização para monitorizações sucessivas, por serem necessários tempos de aquisição elevados e por manter uma actividade residual importante.

Assim pretende-se com este trabalho, averiguar a existência de condições para o uso da espectrometria de Bonner em modo passivo, que permita uma monito-

¹ Acelerador Linear

rização de neutrões em “quase tempo real” a partir da ponderação dos seguintes aspectos:

- Existência de um elemento, com taxas de activação superiores ou semelhantes às do ^{197}Au .
- O isótopo que resulta da activação, apresenta no seu processo de decaimento, um fotópico abundante, permitindo uma fácil determinação da actividade de saturação,
- O isótopo que resulta da activação, apresenta um tempo de semi-vida curto, condicionando assim uma rápida queda de actividade da amostra utilizada como detector,
- Verificar se a incidência dos neutrões gerados, para pontos de interesse (50 cm do isocentro) é uniforme ao longo do volume ocupado pelo conjunto das esferas utilizadas, de forma a se poder efectuar a irradiação simultânea das esferas, sem perda de exactidão do espectro obtido.
- verificar se as dimensões da amostra, utilizada como detector apresenta, um numero de átomos suficientes, para garantir que a sua função de resposta, não se altera para um dado padrão e período de utilização,
- definição da geometria da amostra, que optimiza a função de resposta,

Será então numa primeira parte, e com base em considerações analíticas, efectuada pesquisa de elementos que apresentem características que permitam satisfazer os requisitos anteriores, e numa segunda parte efectuadas simulações de forma a se verificar a possibilidade da utilização desta técnica em monitorizações sucessivas.

Em suma quando se utiliza na espectrometria de Bonner o ^{197}Au , como detector passivo:

- existe necessidade de longos períodos de exposição da amostra,
- longos períodos de medida da actividade, no processo de determinação da actividade de saturação da amostra,

-
- necessidade de longos períodos de espera, para se atingir uma actividade residual da amostra (devido a um tempo de semivida de cerca de dois dias), de forma a se poder efectuar nova medida.

estes aspectos impedem a utilização, da espectrometria de Bonner com ^{197}Au para monitorizações sucessivas.

Assim se das ponderações analíticas resultar um elemento que apresente uma boa taxa de activação, apresentando o isótopo resultante um tempo de semivida curto, torna-se possível, após o tempo de espera necessário para se atingir uma actividade residual do detector (cerca de 5 tempos de semivida) a utilização do sistema em nova medida do espectro de neutrões.

Capítulo 2

Radioterapia, princípios de dosimetria e LINAC

Considerando que este trabalho, é de forma essencial, centrado nos seguintes pontos:

- dar ênfase ao problema de radioprotecção , que a contaminação de neutrões associada alguns esquemas radioterapêuticos, constitui na actualidade em salas de radioterapia,
- otimizar a técnica de Bonner, a partir do uso de elementos alternativos ao ^{197}Au , como detectores passivos, de forma a ajustar uma técnica de natureza indirecta, a monitorização quase directa.

apenas será efectuada e numa perspectiva de contextualização, uma breve e sumária abordagem relativa à radioterapia[3][4].

Tendo em consideração os efeitos biológicos que a radiação ionizante, provoca nos tecidos quer por mecanismos directo, quer por mecanismos indirectos (radiólise da água), e atendendo aos diferentes efeitos para uma mesma dose que se verificam para diferentes radiações, diferentes tecidos e diferentes estados fisiológicos (estado de oxigenação por exemplo), poderemos de uma forma simples definir radioterapia, como o uso controlado da radiação ionizante, de forma a se conseguir depositar doses suficientes para causar a morte do tecido alvo, com minimização de dose depositada no tecido circundante. Atendendo a estes aspectos,

existem diferentes modalidades e esquemas terapêuticos utilizados, que diferem em aspectos como, forma de irradiação (local ou externa), radiação utilizada etc..

Assim ao longo deste capítulo, será numa primeira parte feita uma breve revisão dos modos de radioterapia, numa segunda uma breve revisão relativa aos princípios de dosimetria, e por fim uma breve abordagem ao LINAC.

2.1 Modos de Radioterapia

Existem varias modalidades de radioterapia que variam em aspectos como, localização relativamente à zona a tratar da fonte de radiação, tipo de radiação utilizada, modo e taxa de deposição da dose de radiação definida para o tratamento. De seguida apresenta-se de forma sumária as varias modalidades de radioterapia.

Braquiterapia

A braquiterapia, surge como o modo de radioterapia em que a fonte de radiação é colocada no interior ou na proximidade da zona a irradiar.

Pode ser classificada de acordo com os seguintes aspectos como:

- local onde é colocada a fonte de radiação (intracavitária, superficial, endoluminal, intersticial)
- taxa de dose utilizada (taxa de dose baixa, taxa de dose pulsada, taxa de dose media, taxa de dose elevada)
- permanente ou temporária,

De uma forma geral, a braquiterapia é um dos tratamentos de primeira opção no tratamento do cancro da próstata, e podem ser utilizados vários isótopos como fontes de radiação sendo na braquiterapia de taxa de dose elevada, o ^{192}Ir um dos isótopos mais usados.

Externa ou teleradioterapia

Na teleradioterapia, a fonte de radiação é colocada exteriormente a área a irradiar, e podem ser utilizados vários tipos de radiação. De uma forma geral na actualidade, quando são utilizados feixes de fótons ou electrões o equipamento mais utilizado na sua produção é o LINAC.

Os electrões são utilizados, no tratamento de tumores superficiais, enquanto que os fótons são utilizados considerando a sua maior penetrabilidade no tratamento de tumores mais profundos.

Na figura seguinte apresenta-se o perfil de deposição de energia em profundidade, para feixes de fótons de diferentes energias:

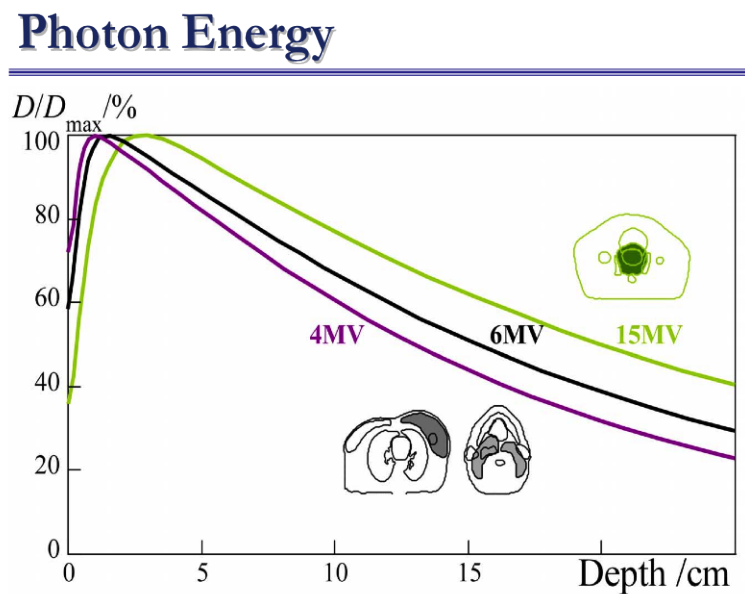


Figura 2.1: Perfil de deposição de dose em profundidade, para fótons [5]

Existem varias técnicas, de radioterapia com fótons como:

- Convencional 2D ,
- CRT¹

¹Conformal Radiation Therapy

- IMRT¹

As técnicas convencionais com uso de campos de radiação estáticos, conseguidos a partir dos colimadores tradicionais, ou as técnicas conformais, que utilizam colimadores multifolhas, para uma melhor definição do volume a tratar, utilizam de forma geral campos de intensidade fixa com feixes de fótons de energia superior a 10 MeV, resultando contaminação neutrónica importante.

Por outro lado, na IMRT de forma geral são utilizados, campos de radiação com modulação de intensidade, e feixes de fótons com energia inferior ao limiar das foto-reacções nucleares, que estão na base da produção dos neutrões para os materiais, que constituem o LINAC e a sala de radioterapia, verificando-se assim nesta técnica uma menor produção de fotoneutrões.

Pode-se acrescentar, ainda que se por um lado as técnicas conformais, reduzem a dose colateral proveniente da dispersão fotónica, ao providenciarem a partir do colimador multifolhas, uma definição mais exacta do volume a tratar, o facto de ser necessário (por maior colimação derivada da conformação dada ao feixe a partir dos colimadores multifolhas), uma maior intensidade do feixe primário, para a deposição de uma mesma dose, aumenta significativamente a produção de fotoneutrões. Assim se por um lado com estas técnicas se diminui relativamente as técnicas convencionais, a dose colateral proveniente de fótons aumenta-se a dose colateral proveniente de neutrões.

Hadroterapia

É um modo particular de radioterapia externa, em que são usados feixes de prótons ou iões de carbono. As suas principais vantagens, relacionam-se com o facto de se utilizar radiação como uma maior eficiência radiobiológica e se conseguir uma deposição de dose maior no tecido alvo, com menor deposição nos tecidos adjacentes, o que é justificado com a curva que caracteriza a sua transferência linear de energia, nomeadamente com o pico de Bragg. Na figura seguinte apresenta-se o perfil da deposição de energia em profundidade, para diferentes

¹Intensity Modulated radiation Therapy

partículas:

Depth Dose Curve

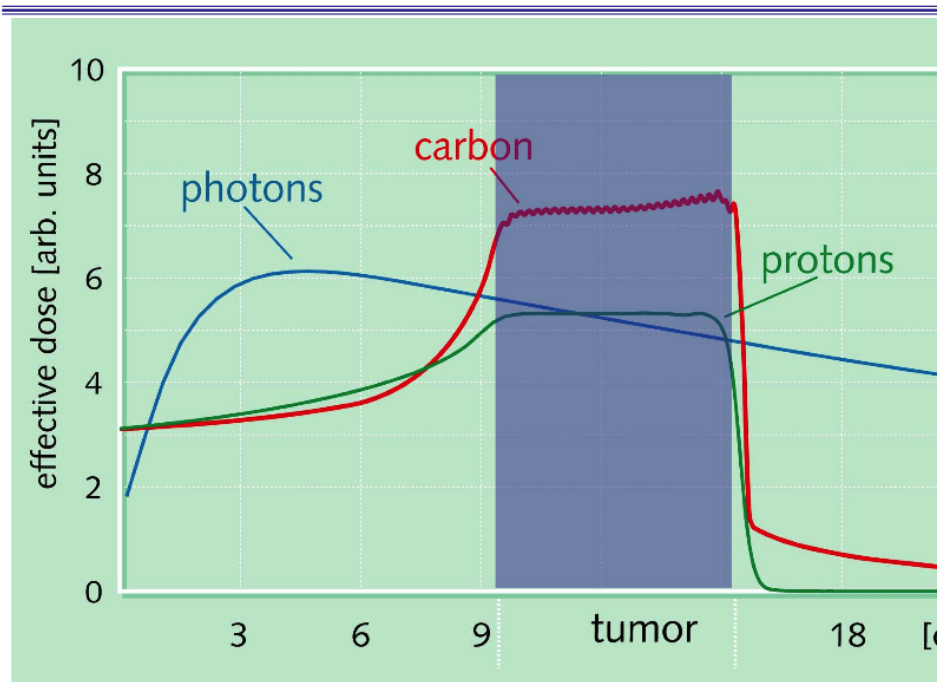


Figura 2.2: Perfil de deposição de dose em profundidade , para prótons e íons de carbono[5]

Da análise da curva 2.2, podemos verificar que o perfil de deposição de energia para prótons e íons de carbono, apresenta uma maior percentagem de deposição de dose nos tecidos mais profundos, correspondendo essa região à sobreposição dos picos de Bragg para feixes com diferentes energias, conforme se representa na figura seguinte:

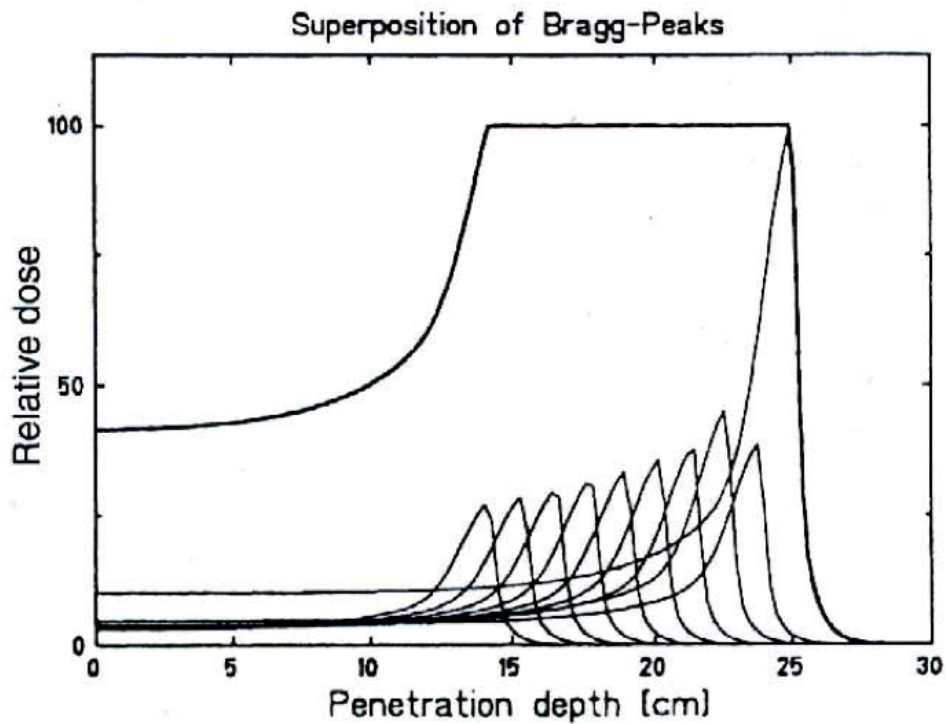


Figura 2.3: Percentagem de dose em profundidade para feixes de prótons de energia distinta em água, destacando-se a sobreposição dos picos de Bragg [6]

O facto de radiação deste género, depositar a maior parte de energia na zona do pico de Bragg, zona localizada em profundidades imediatamente antes do seu alcance no tecido, permite uma maior deposição de dose no tumor com menor deposição de dose no tecido adjacente

Pode-se acrescentar ainda que pelo facto de na hadroterapia se utilizarem partículas de maior LET¹, esta modalidade mostra uma eficiência menos dependente da oxigenação dos tecidos, pois o dano que esta radiação provoca no tecido é de forma essencial provocado por processo directos.

¹transferência linear de energia

2.2 Interações da radiação com a matéria

Ao longo deste trabalho será para vários contextos feita referência à interacção da radiação com a matéria. Assim será feita neste ponto, uma breve descrição dos principais mecanismos de interacção com a matéria, para as partículas carregadas e para os fotões. Tendo em consideração aspecto central dos neutrões neste trabalho, será posteriormente e em capítulo próprio, feita referência às interacções dos neutrões com a matéria.

De um modo sumário, podemos dizer que partículas carregadas, interagem de forma directa, ionizando e excitando os átomos que constituem um dado material, apresentando alcances bem definidos, enquanto fotões e neutrões interagem de forma indirecta, transferindo energia para partículas carregadas, as quais numa segunda fase transferem por interacção directa, energia para o meio, sofrendo apenas atenuação.

De uma forma geral o processo de interacção acontece por intermédio da dispersão na qual a partícula incidente colide de forma elástica ou inelástica com os átomos do alvo, ou através da absorção, no qual a partícula incidente simplesmente desaparece dando origem a um núcleo composto, o qual de acordo com a sua natureza e contexto energético, poderá desencadear uma serie de processos durante a sua desexcitação.

A secção eficaz é utilizada, na caracterização quantitativa das reacções induzidas por um dado feixe de partículas. Matematicamente, o numero de eventos por unidade de tempo, verificados quando um feixe de partículas colide com um dado alvo, e se se considerar que J o qual representa o numero de partículas por unidade de área por unidade de tempo, é constante ao longo do alvo, é expresso por:

$$\Phi = J \cdot \sigma \cdot N \tag{2.1}$$

representando N o numero de átomos do alvo e σ a secção eficaz, a qual é de expressa em unidades de área, vindo geralmente em barn, com $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

O valor da secção eficaz é específico para cada um dos mecanismos de interacção, e representa a probabilidade, dessa interacção acontecer. No caso por exemplo da dispersão e absorção temos respectivamente σ_s e σ_a . A secção efi-

caz total, surge como a soma das secções eficazes que representam cada um dos processos de interacção, sendo expressa como:

$$\sigma_t = \sum_i \sigma_i \quad (2.2)$$

2.2.1 Partículas carregadas

Quando partículas carregadas, atravessam um dado meio material, podem desencadear os seguintes processos:

- colisões elásticas com os electrões das camadas electrónicas,
- colisões elásticas com o núcleo,
- colisões inelásticas com os electrões das camadas electrónicas, com transferência de energia para processos de ionização e excitação,
- deflexão da trajectória da partícula incidente, pelo campo de Coulomb criado pelo núcleo atómico, com conseqüente produção de radiação de Bremsstrahlung,
- colisões inelásticas com o núcleo, com formação de estados excitados do núcleo ou indução de reacções nucleares,
- produção de radiação de Cerenkov, sempre que a velocidade das partículas seja superior à velocidade da luz no meio em análise,

sendo os processo dominantes, função da energia e tipo de partícula incidente.

2.2.1.1 Transferência de energia para partículas pesadas

A transferência de energia num dado meio, por partículas pesadas carregadas, para os electrões das camadas electrónicas dos átomos constituintes, é expressa através da formula de Bethe-Block. Para partículas incidentes de baixa energia ($\beta \ll 1$), a fórmula de Bethe é expressa como:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \frac{4\pi n z^2}{\nu^2 m_e} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{2m_e \nu^2}{I}\right) \quad (2.3)$$

representando m_e a massa de repouso do electrão, n a densidade electrónica do meio, I o potencial médio de ionização do meio e ν a velocidade das partículas incidentes.

Da expressão anterior, observa-se que a transferência de energia (para partículas de baixa energia), decresce aproximadamente com o aumento da energia das partículas incidentes de acordo com $1/\nu^2$, até se atingir um mínimo com valor entre $E = 2Mc^2$ e $E = 3Mc^2$, representando M a massa da partícula incidente.

Como consequência desta observação, temos que as partículas pesadas, perdem a maior parte da sua energia no final da sua trajectória, dando origem ao pico de Bragg. Este facto surge com o fundamento das terapias de prótons e iões de carbono.

2.2.1.2 Transferência de energia para electrões

Os electrões no trajecto que fazem num dado meio transferem energia através de colisões e através de geração de radiação:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} \quad (2.4)$$

A perda de energia por colisões para os electrões com energias não relativista pode ser expressa como:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \frac{e^4 n_e}{4\pi\epsilon^2 \nu^2 m_e} \left(\ln \frac{m_e \nu^2}{2\langle E_B^{(e)} \rangle} \right) \quad (2.5)$$

e para energia relativísticas como:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \frac{e^4 n_e}{4\pi\epsilon^2 c_e^m} \left(\ln \frac{E_e \sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}\langle E_B^{(e)} \rangle} + \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \right) \quad (2.6)$$

Considerando as leis do electromagnetismo, todas as partículas carregadas que sofrem aceleração emitem radiação. Assim nas sucessivas mudanças de direcção, ou perdas de velocidade que a partícula efectua ao atravessar um dado meio, gera radiação de Bremsstrahlung. A energia perdida por radiação pela interacção dos electrões com núcleos pesados é estimada a partir da seguinte expressão:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} \sim N_v E_e Z^2 \ln E_e \quad (2.7)$$

2.2.1.3 Alcance das partículas carregadas na matéria

O alcance médio $\langle R \rangle$, das partículas pesadas é estimado a partir de :

$$\langle R \rangle = \int_{E_{part}}^0 \frac{dE}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)} \quad (2.8)$$

Aplicando na equação anterior à expressão (2.3), determina-se a expressão que permite o cálculo do alcance na matéria para partículas carregadas pesadas:

$$\langle R \rangle = \frac{m_{part} \nu_{part}^4}{z^2} \quad (2.9)$$

Esta equação, atendendo à sua reduzida massa, não se aplica aos electrões.

Considerando que para um feixe de fotões, se verifica uma diminuição continua do número de electrões com a profundidade, torna-se necessário, distinguir o seu alcance médio do alcance máximo.

Para fins terapêuticos utilizam-se electrões com energia compreendida entre 1-50 MeV, sendo o alcance máximo dos electrões para energias desta ordem, aproximado por:

$$\frac{R_{max}}{cm} = \frac{0.5 E_i}{MeV} \quad (2.10)$$

2.2.2 Fotões

Os fotões interagem através da força electromagnética, com os electrões das camadas atómicas, com os núcleos ou com outros campos electromagnéticos, de forma elástica preservando o comprimento, ou de forma inelástica com alteração do seu comprimento de onda.

As interacções elásticas são dominantes para baixas energias, e incluem, a dispersão coerente de Rayleigh, a dispersão de Thomson e o efeito de Mossbauer. As interacções inelásticas incluem o efeito de Compton, a o efeito foto-eléctrico, e a produção de pares.

Ao contrário das partículas carregadas, para os fótons não é possível definir alcance, definido-se apenas a sua atenuação para um dado meio como:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad (2.11)$$

representando Φ_0 o fluxo inicial e μ o coeficiente linear de absorção, o qual resulta do produto da densidade atômica do meio com secção eficaz efectiva, correspondendo este à soma das secções eficazes pra cada uma das possíveis interações (efeito foto-eléctrico de Compton e produção de pares).

O seguinte diagrama compara as diferentes interações, em função do número atômico dos átomos que constituem um dado meio e da energia dos fótons incidentes:

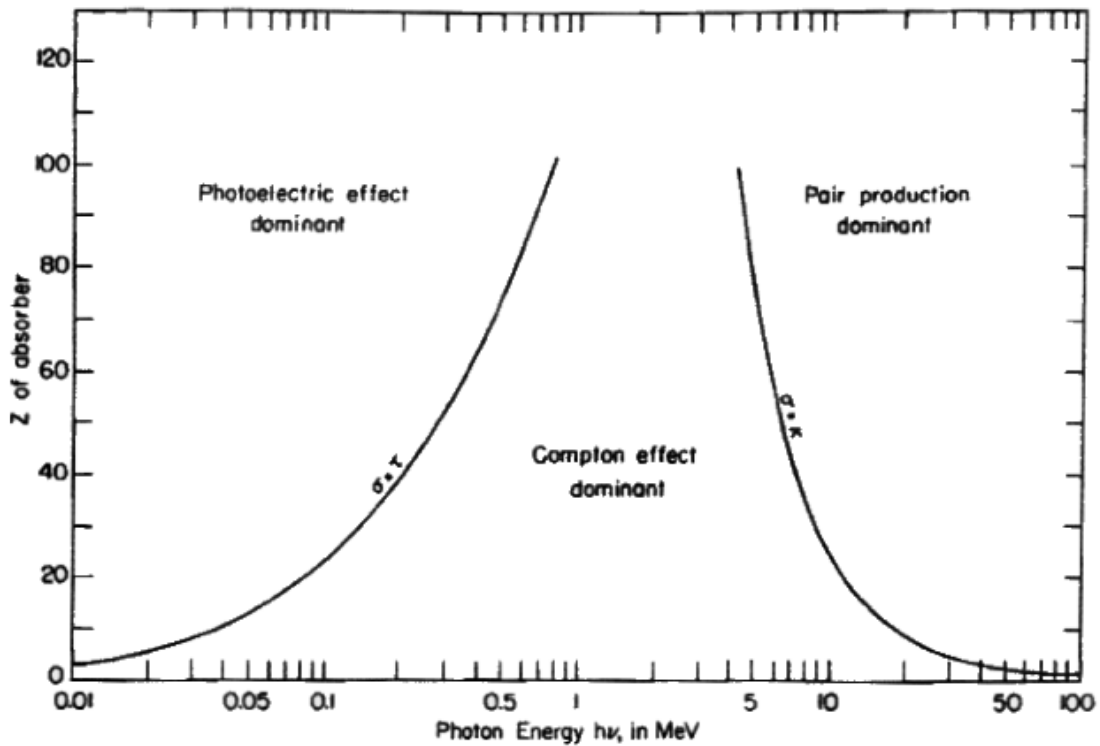


Figura 2.4: Interações dos fótons em função das sua energias, e o numero atômico do material [7]

2.3 Princípios de dosimetria

Tendo em consideração que a dosimetria assume um papel central, quer nos métodos de planeamento de deposição de dose para fins terapêuticos, quer nos aspectos de radioprotecção, será ao longo deste ponto efectuada uma breve abordagem às quantidades dosimétricas.

Quantidades dosimétricas usuais

As curvas que representam a resposta do tecido cancerígeno, à radiação ionizante, e as curvas que representam as lesões secundárias do tecido saudável à exposição de radiação ionizante, têm de uma forma geral um comportamento sigmoideal. Assim, quer para fins de planeamento radioterapêutico, quer para fins de radioprotecção, torna-se necessário, a ponderação precisa das quantidades dosimétricas que caracterizam um dado campo de radiação.

Neste contexto, será efectuada ao longo deste ponto, a apresentação sucinta das principais quantidades dosimétricas utilizadas na caracterização do feixe de radiação, na ponderação de dose e do respectivo efeito biológico, e das quantidades utilizadas na ponderação da dose ambiental.

2.3.1 Quantidades utilizadas na caracterização do feixe de radiação

As quantidades que a seguir se apresentam, são utilizadas na caracterização de um feixe de fotões, no entanto podem de forma geral aplicar-se a feixes de partículas carregadas.

Fluência de partículas

Surge como o quociente dN por dA , representando dN o número de partículas que incidem sobre uma esfera de área de secção transversal dA . É matematica-

mente expressa como:

$$\phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.12)$$

O facto de se considerar, que a área de secção transversal da esfera é perpendicular à direcção de cada uma das partículas incidentes, torna a fluência de partículas independente do angulo de incidência da radiação. Utiliza-se como unidade de fluência, m^{-2} .

Fluência de energia

É definida como o quociente dE por dA , representando dE a energia radiante que incide sobre uma esfera com área de secção transversal dA . A sua unidade é $J.m^{-2}$, e é expresso a partir de:

$$\psi = \frac{dE}{dA} \quad (2.13)$$

no caso de se tratar de um feixe monoenergético, expressa-se como:

$$\psi = \frac{dN}{dA} E = \phi E \quad (2.14)$$

Nas situações mais realistas, os feixes são de forma geral polienergéticos, tornando-se necessário a utilização da definição de fluência espectral, e da fluência de energia espectral.

A primeira representa o número de partículas por energia por unidade de área, e é expressa como:

$$\phi_E = \frac{d\phi}{dE}(E) \quad (2.15)$$

e a segunda representa a energia que flui por unidade de área, para cada uma das energias que as partículas que constituem o feixe apresentam, e expressa-se como:

$$\psi_E = \frac{d\psi}{dE}(E) = \frac{d\phi_E}{dE} E \quad (2.16)$$

Taxa de Fluência de partículas

Surge como o número de partículas, por unidade de área por unidade de tempo, é expressa matematicamente a partir de:

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.17)$$

Sendo a sua unidade $m^{-2}.s^{-1}$.

Taxa de Fluência de energia

É expressa em $W.m^{-2}$, representando a fluência de energia por unidade de tempo. É definida matematicamente como:

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt} \quad (2.18)$$

2.3.2 Quantidades utilizadas na ponderação de dose e efeito biológico

*KERMA*¹

Surge como o acrónimo da expressão em inglês kinetic energy released per unit mass. É uma grandeza de natureza não estocástica, que representa a energia média, transferida por radiação não directamente ionizante, como os fótons e os neutrões, para radiação directamente ionizante como as partículas carregadas.

Concretizando para o caso dos fótons, podemos dizer que estes quando atravessam um dado meio, depositam energia neste em duas etapas. Na primeira

¹kinetic energy released per unit mass

etapa transferem a partir dos processos que caracterizam a sua interacção (efeito fotoeléctrico, efeito de Compton, ou produção de pares), energia para partículas secundárias carregadas, transferindo estas numa segunda etapa, através da ionização e excitação energia para o meio.

Assim o Kerma pode ser definido como a energia média, transferida por radiação não directamente ionizante, para partículas carregadas, num dado meio, por unidade de massa, sendo matematicamente expresso como:

$$K = \frac{d\bar{E}_{tr}}{dm} \quad (2.19)$$

apresentando como unidade $J.kg^{-1}$.

*CEMA*¹

Surge como o acrónimo da expressão em inglês converted energy per unit mass. É uma grandeza de natureza não estocástica, utilizada na quantificação das perdas médias de energia por partículas carregadas por unidade de massa do meio em análise, não sendo consideradas as perdas de energia das partículas secundárias. É matematicamente representada por:

$$C = \frac{dE_c}{dm} \quad (2.20)$$

sendo expresso em unidades de $J.Kg^{-1}$.

*LET*²

Surge como a medida, da energia depositada pela radiação ionizante num dado material, por unidade de comprimento ao longo do percurso que esta efectua no material, sendo utilizada na quantificação dos efeitos biológicos provocados pela radiação ionizante.

¹converted energy per unit mass

²Transferência linear de energia

De uma forma geral, o LET, varia de forma significativa com velocidade e carga das partículas que constituem a radiação ionizante, sendo o efeito biológico provocado por radiação de elevado LET, muito maior que o efeito biológico provocado por radiação de baixo LET, para radiações com a mesma energia.

*RBE*¹

Surge como a razão entre a dose de radiação de baixo LET e a dose de radiação de elevado LET que provoca os mesmos efeitos biológicos.

Quando a radiação é absorvida no material biológico, a energia é depositada ao longo dos trajectos efectuados pelas partículas carregadas, com um padrão característico para cada tipo de radiação. Para o caso de radiação de elevado LET, como os neutrões protões e partículas alfa, verifica-se uma elevada densidade de ionização ao longo destes trajectos, o que traduz um maior dano e por consequência um efeito biológico mais acentuado, enquanto que radiação de baixo LET, como os fotões se verifica uma baixa densidade de ionização.

Tendo em consideração os aspectos anteriores, o RBE surge como a grandeza que relaciona, as doses absorvidas necessárias, para se verificar um mesmo efeito biológico, entre radiações de diferente LET.

Dose absorvida(D)

definida matematicamente como:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.21)$$

É de natureza não estocástica e representa a energia média depositada por radiação ionizante, num dado volume por unidade de massa. A energia depositada

¹Efeito biológico relativo

resulta das soma de toda a energia que entra no volume considerado, menos a energia que sai do mesmo volume. É expressa em Gray (Gy), com $1Gy = 1J.kg^{-1}$

Dose equivalente(H_t)

Tendo em consideração que o efeito biológico provocado por uma determinada radiação, não depende apenas da energia depositada, mas também da forma como é depositada, sendo mais eficiente a transferir energia para o meio radiação com maior LET, surge a necessidade de definir para cada tipo de radiação um factor de ponderação que expresse o dano provocado por dose absorvida.

Assim matematicamente a dose equivalente é definida como:

$$H_{t,r} = w_r D_{t,r} \quad (2.22)$$

Sendo expressa em Sievert (Sv), e representando w_r o factor de ponderação específico de cada tipo de radiação e $D_{t,r}$ a dose absorvida , pelo tecido t depositada pela radiação r.

Para um campo de radiação utiliza-se a dose equivalente total definida a partir do seguinte somatório:

$$H_{t,r} = \sum_r w_r D_{r,t} \quad (2.23)$$

Os factores de ponderação (w_r) apresentados na seguinte tabela, foram estipulados pela ICRP-103 com base nos valores do RBE, da radiação na indução de efeitos estocásticos a baixas doses, sendo referentes à radiação externa incidente sobre o corpo ou à radiação emitida por radionuclídeos depositados internamente.

Tipo de radiação	Energia	Factor de ponderação (w_r)
Fotões	Todas as energias	1
Electrões e muões	Todas as energias	1
Neutrões	<10 keV	2,5
	10keV-100keV	2,5-10
	2MeV-20MeV	10-20
	>20MeV	5-7
Protões	>2MeV	2
Partículas α , fragmentos de fissão e núcleos pesados		20

Figura 2.5: Valores do factor de ponderação w_r para diferentes radiações e energias[8]

Da tabela 2.5, observa-se que o peso da radiação para os neutrões apresenta um factor 20 para determinadas faixas de energia, o que justifica para fins de radioprotecção a importância de monitorização dos campos de radiação secundários, constituídos por neutrões. Os factores de peso da radiação (w_r), para os neutrões, podem ser obtidos a partir da seguinte expressão (ICRP-60):

$$w_r = 5 + 17 \exp \frac{-(Ln(2E_n))^2}{6} \quad (2.24)$$

sendo E_n , é a energia do neutrão em MeV.

2.3.3 Quantidades utilizadas na ponderação da dose ambiental

O presente trabalho centra-se de forma essencial, na monitorização do campo de neutrões em espaços de radioterapia externa com feixe de fotões. Assim ao longo deste ponto serão apresentadas, as definições de dose ambiental, e posteriormente e considerando que o efeito biológico dos neutrões é função da sua energia, as quantidades usadas na ponderação da "agressividade" de um dado campo de neutrões.

De uma forma geral define-se dose ambiental equivalente $H^*(d)$, para um dado

ponto de um campo de radiação, como:

O valor de dose equivalente que seria produzido, por esse mesmo campo, quando expandido e alinhado na esfera ICRU [9] a uma profundidade d , no raio que se opõe ao campo alinhado.

E dose direccional equivalente $H'(d, \Omega)$, num ponto do campo de radiação como:

a dose equivalente que é produzido pelo correspondente campo expandido, na esfera ICRU, à profundidade d , numa direcção, Ω , especificada.

A esfera ICRU é uma esfera constituída de material equivalente ao tecido humano mole, em termos de atenuação e absorção de radiação, denominado substituto de tecido, com 30 cm de diâmetro, com uma densidade de 1 g.cm^{-3} e uma composição em massa de 76,2% de oxigénio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogénio e 2,6% de azoto. Na figura seguinte ilustra-se o processo de medida da dose ambiental para uma distância de 10 mm na esfera ICRU:

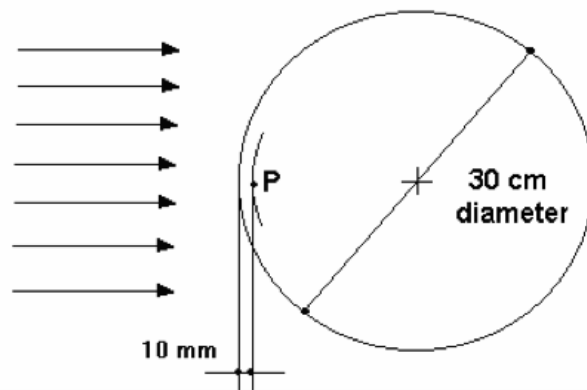


Figura 2.6: Esfera ICRU, com representação do processo de medida da dose ambiental para uma profundidade d

Tendo em consideração a definição de dose ambiental equivalente, e que o factor de ponderação dos neutrões é função da sua energia, utilizam-se então na caracterização dosimétrica de um campo de neutrões as seguintes quantidades:

Coefficiente de ponderação médio da dose ambiental, para uma dada distância d:

$$\int h(d, E) \cdot \varphi(E) \cdot dE \quad (2.25)$$

sendo $h(d, E)$ o coeficiente de ponderação para a distancia d e para a energia E , e $\varphi(E)$ o espectro de neutrões do campo de radiação em análise.

Energia média da fluência espectral de neutrões:

$$\bar{E} = \int E \varphi(E) dE \quad (2.26)$$

Dose ambiental equivalente média:

$$H = \int E \cdot h(d, E) \cdot \varphi(E) \cdot dE \quad (2.27)$$

2.3.4 Aspectos de radioprotecção numa unidade de radioterapia

Tendo em consideração o conceito de ALARA/ALARP¹ (as low as reasonably achievable/practicable), as pessoas que trabalham com radiação ionizante devem reduzir dentro do possível a sua exposição e a de outros que possam hipoteticamente ser expostos a essa mesma radiação.

De uma forma geral podemos dizer que para satisfazer o ALARA, se utilizam procedimentos que integram os três princípios básico de redução de contacto com a radiação: tempo de exposição, distância e blindagem.

Assim numa sala de radioterapia externa com fotões, gerados por um LINAC, utilizam-se geralmente os seguintes procedimentos de radioprotecção:

¹as low as reasonably achievable/practicable

Blindagem do LINAC

O LINAC apresenta na sua estrutura regiões de maior probabilidade de libertação de radiação secundária por Bremsstrahlung, nomeadamente onde existe desaceleração de electrões como no amplificador da radiofrequência, magnetes e gerador de electrões.

Geralmente o fabricante, utiliza nestas zonas material de elevado número atómico, com espessura adequada à a atenuação da energia dessa mesma radiação.

Aspectos estruturais

- O LINAC é colocado num "Bunker"labiríntico, com paredes de espessura e materiais adequados, à atenuação adequada dos fotões dispersos durante a sessões de tratamento, de forma a que os funcionários, não sejam no exterior expostos a dose nefastas.
- Tendo em consideração, que em modalidades, cuja a contaminação neutrónica é elevada, existe o risco de activação dos elementos constituintes do ar, são usados equipamento de ventilação, para evitar a contaminação que pode advir do decaimento dos isótopos formados.
- A porta utilizada na sala de radioterapia, apresenta um camada de material hidrogenado, de forma a moderar os neutrões libertados, tornando-os assim menos "agressivos" em eventuais exposições por parte dos funcionários.

Aspectos funcionais

Sempre que existe nos procedimentos contactos com radiação, deve-se encurtar dentro do possível o tempo de contacto com esta. De forma geral é feita monitorização individual da dose absorvida a todos os funcionários, com risco de exposição a radiação ionizante.

2.4 LINAC

No tratamento de tumores localizados em tecidos profundos, é necessário utilizar feixes de fótons megavoltáicos, pelas seguintes razões:

- Apresentam maior penetrabilidade,
- O perfil de dose depositada, apresenta uma deslocação da dose máxima para zonas de maior profundidade, para feixes de maior energia,
- Para energias da ordem do MeV o mecanismo principal de interacção dos fótons com a matéria é o efeito de Compton, o qual não é de forma significativa dependente da densidade de electrões, evitando-se assim deposição de doses elevadas no tecido ósseo.

Tendo em consideração estes aspectos, ao contrário do que acontece para fins diagnósticos, e de tratamentos de tumores superficiais, onde são utilizados raios-X ortovoltáicos da ordem das dezenas de keV, para tratamento de tumores localizados em tecidos mais profundos, é necessário utilizar feixes de fótons da ordem do MeV.

Atendendo a que os aceleradores electrostáticos, baseados na imposição directa de uma diferença de potencial, conseguida com a utilização de transformadores, tem limitação técnica para 300 kV, na produção de feixe de electrões ou fótons megavoltáicos, é necessário recorrer a outros mecanismos de transferência de energia, no processo de aceleração dos electrões. Ao longo das últimas décadas, foram utilizadas para este propósito, várias tecnologias, como Microtrons, Beta-trons, entre outras, no entanto de uma forma geral na actualidade o acelerador mais utilizado em unidades de radioterapia convencional é o LINAC [10][11].

De uma forma geral, o LINAC clínico, não apresenta necessidade de instalações de grande dimensão, e permite a produção de feixes de electrões e fótons, de intensidade e energia variada, tornando-o um equipamento apelativo para fins clínicos, pois permite a geração de feixe com características adaptáveis às diferentes situações (localização do tumor, tipo, etc).

Em espaço de radioterapia são utilizados LINAC's que permitem produção de feixe de fótons com energia compreendida entre 6 -22 MeV (apresentando assim uma boa flexibilidade, para tratamento de diferentes tipos e localizações de

tumores). Tendo em consideração estes aspectos, e atendendo ao facto de que a presente tese é dirigida a monitorização de neutrões em LINAC de uso clínico, será neste capítulo efectuada uma abordagem sumária dos princípios de funcionamentos do LINAC, das suas componentes e dos seus modos de funcionamento.

2.4.1 Princípios de funcionamento e radiação produzida por um LINAC de uso clínico

Em aceleradores lineares, o electrão ganha energia quando interage com campos electromagnéticos sincronizados com a sua velocidade, ao contrário do que acontece em equipamentos de produção de raios-X ortovoltáico, em que estes ganham energia por imposição directa de uma diferença de potencial.

Assim os electrões produzidos a partir da emissão termiónica são acelerados electrostaticamente, até ao guia de onda, e sincronizados neste com a frequência de pulso utilizado, ganhando energia de forma análoga ao que aconteceria se um “surfista” se mantivesse sempre na “crista” de uma onda.

O LINAC de uso clínico permite produzir feixes de electrões ou de fotões, com energias desde os 4 MeV aos 25 MeV, utilizando campos electromagnéticos cíclicos e sincronizados com a velocidade dos electrões, de forma a que estes atravessem sucessivamente uma mesma diferença de potencial.

Relativamente ao modo de funcionamento, no caso de se produzirem feixes de electrões, estes serão acelerados no guia de onda e posteriormente direccionados por magnetes para a zona de irradiação. No caso de serem utilizados feixes de fotões, os electrões acelerados são direccionados para um alvo, constituído por uma mistura de metais pesados, sendo o espectro resultante uma sobreposição da radiação característica com a radiação de Bremsstrahlung.

2.4.2 Componentes de um LINAC

Na figura seguinte esquematiza-se um LINAC integrado num equipamento de radioterapia, descrevendo-se de seguida cada uma das suas componentes:

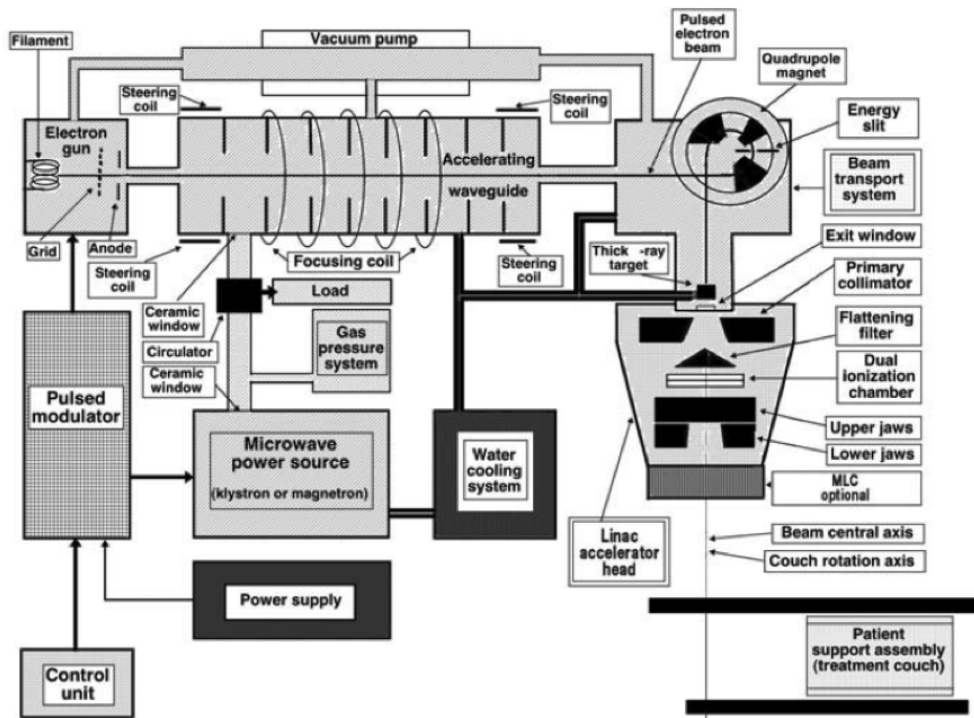


Figura 2.7: LINAC integrado num equipamento de radioterapia[3]

- *Sistema de injeção*, surge como um simples acelerador electrostático, colocado anteriormente ao guia de onda. Os electrões são termoionicamente emitidos pelo cátodo aquecido, e acelerados por um ânodo perfurado, permitindo a sua passagem para o guia de onda.
- *Sistema de geração de potência de radiofrequência*, O princípio de base do funcionamento do LINAC, relaciona-se com o ganho de energia sucessivo pelo electrão, numa cavidade rectilínea sob vácuo, quando este é sujeito a um campo electromagnético cíclico. A frequência e a potência deste campo, são definidas em função da energia do feixe pretendido, utilizando-se de forma geral nos aceleradores clínicos uma frequência de 2998 MHz. Os dispositivos que geralmente se utilizam para a geração do campo electro-magnético de microondas são o Clistrão e o Magnetrão.

-
- *Guia de onda* - Surge como o elemento principal do acelerador, podendo ser visualizada como uma estrutura rectilínea oca sob vácuo, dividida por uma serie de discos que formam sucessivas cavidades de aceleração. O guia de onda é percorrida pelos campos de microondas gerados no sistema de radiofrequência, transmitindo nas sucessivas cavidades de aceleração energia para o electrão. A forma como é efectuada a transmissão do campo electromagnético, para o guia de onda define os dois modos de funcionamento do LINAC:
-traveling wave , e standing wave.

- sistemas auxiliares:

- *Sistema de arrefecimento*, utilizado para remoção do calor gerado nas perdas resistivas da parede do guia de onda e nas colisões dos electrões com o alvo.
- *bomba de vácuo* de forma a se produzir uma pressão de 10^{-6} torr no guia de onda e no sistema de geração de radiofrequência
- *Sistema de transporte do feixe de electrões*, composto por uma serie de magnetes, de forma a se estabelecerem as mudanças de direcção inerentes a cada configuração do acelerador,
- *Sistemas de protecção radiológica*, o LINAC apresenta regiões onde podem ser gerados campos de radiação secundários, sendo necessário blindagem com material adequado. De uma forma geral estes campos secundários de raios-X são originados por radiação de Bremsstrahlung em locais onde se verifica paragem de electrões como :
 - * Os electrões que não passam no sistema de injeção para o guia de onda,
 - * Os electrões que colidem no colector do Clistrão no sistema de geração de radiofrequência,
 - * os electrões que no guia de onda não estão correctamente focados no seu centro colidindo com as paredes deste,
 - * Nos magnetes, uma vez que apenas os electrões com velocidade

adequada ao desvio predefinido pela intensidade do campo magnético, seguem o trajecto prestabelecido.

Capítulo 3

Física de neutrões

Ao longo deste capítulo, e contextualizado no facto da monitorização de neutrões surgir como o aspecto central do presente trabalho, será efectuada uma abordagem com maior detalhe acerca da física subjacente às interacções dos neutrões com a matéria, da moderação de neutrões e da produção de neutrões a partir de foto-reacções nucleares.

3.1 Propriedades do neutrão

O neutrão é uma partícula electricamente neutra, 0,1 % mais massiva que o protão $m_n = 939.573 MeV/c^2$. De acordo com o modelo padrão, o neutrão é um barião, constituído pelo acoplamento de 3 quarks (udd) de spin $\frac{1}{2}$. A sua estrutura interna é responsável pelo valor observado do momento dipolar magnético de $-1.91304273 \mu N$.[\[12\]](#)

O neutrão livre é instável e decai por emissão β^- com um tempo de vida média de 14.76 min através da reacção:



No núcleo, o neutrão ligado pode ter um tempo de vida média maior (podendo chegar a ser estável), ou pode ter um tempo de vida média menor, dependendo do alinhamento relativo das camadas dos neutrões e dos protões no núcleo. O decaimento β^+ é o inverso da equação (3.1), e por ser uma reacção endotérmica

ocorre no interior do núcleo.



Quando a equação (3.2) é energeticamente favorável compete com o processo de captura electrónica, expresso a partir da seguinte equação:



Como o neutrão não possui carga eléctrica, não é afectado pela barreira de Coulomb, e mesmo neutrões de muito baixas energias (na ordem dos meV) podem interagir com o núcleo.

3.2 Reacções nucleares induzidas por neutrões

Os neutrões podem interagir com núcleo de formas distintas, como:

- $n + {}^A Z \rightarrow n + {}^A Z$ dispersão elástica
- $n + {}^A Z \rightarrow n' + {}^A Z^*$ dispersão inelástica
- $n + {}^A Z \rightarrow {}^{A+1} Z + m$ captura radiativa
- $n + {}^A Z \rightarrow {}^{A_1} Z^* + {}^{A_2} Z_2^* + xn$ fissão
- $n + {}^A Z \rightarrow {}^{A+1-x} Z + xn$ multiplicação de neutrões

A probabilidade associada à ocorrência de uma reacção está directamente relacionado com a de secção eficaz para essa reacção. A secção eficaz de uma reacção nuclear é interpretada como sendo a área efectiva de um núcleo vista por uma partícula que com ele sofre uma interacção. A secção eficaz tem portanto dimensões de área e pode ser expressa em cm^2 mas tendo em conta a dimensão das partículas subatómicas, é usualmente expressa em barns, $1barn = 10^{-24}cm^2$.

A magnitude da secção eficaz de uma reacção depende se a reacção é do tipo elástica, inelástica e endotérmica ou inelástica e exotérmica e existe dependência também no tipo de interacção associado à reacção. Os valores em barn para a

secção eficaz podem variar de várias ordens de grandeza, desde os mb (milibarn) aos kb (kilobarn).

A dispersão elástica de um neutrão por um núcleo deve-se à interacção de curto alcance do tipo forte[13]. A secção eficaz deste tipo de interacção é geralmente constante para neutrões de baixa energia e começa a diminuir lentamente com o aumento da energia do neutrão. A baixas energias a secção eficaz sofre a influência do alinhamento ou anti-alinhamento dos spins do neutrão incidente versus nucleões aumentando o seu valor. Com o aumento do momento do neutrão o valor da secção eficaz desce para valores mais congruentes com os esperados pelo alcance da interacção forte. Acima destas 2 regiões existe a região das ressonâncias que aparece devido à formação do núcleo composto. As ressonâncias correspondem a valores mais elevados da secção eficaz para determinadas energias do neutrão incidente que coincidem com os estados excitados do núcleo composto. Para a secção eficaz elástica, a energia do neutrão correspondente às ressonâncias é coincidente com a energia das ressonâncias para a secção eficaz do processo de captura radiativa. A distribuição angular no processo de dispersão elástica neutrão-núcleo é isotrópica desde que o momento do neutrão seja $p < \frac{\hbar}{R}$ ($R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$ - raio nuclear, $R_0 1.2 \times 10^{-15}$ m; p = momento do neutrão incidente).

Para as reacções inelásticas que não sofrem a barreira de Coulomb, como é o caso da interacção neutrão-núcleo, os valores de secção eficaz a baixas energias dependem se a reacção é do tipo endotérmica ou exotérmica. As reacções exotérmicas possuem secções eficazes proporcionais a $1/v$, sendo v a velocidade relativa do neutrão. Reacções endotérmicas possuem um valor limiar para a energia do neutrão.

Considerando que no presente trabalho, a reacção de interesse, na análise da activação dos elementos que se pretendem utilizar como detectores na espectrometria de Bonner passivo, é a captura radiativa, apresenta-se de seguida para o ^{197}Au , o ^{115}In e o ^{51}V , os gráficos que representam as secções eficaz de captura destes elementos em função da energia dos neutrões incidentes, destacando-se as varias ressonâncias:

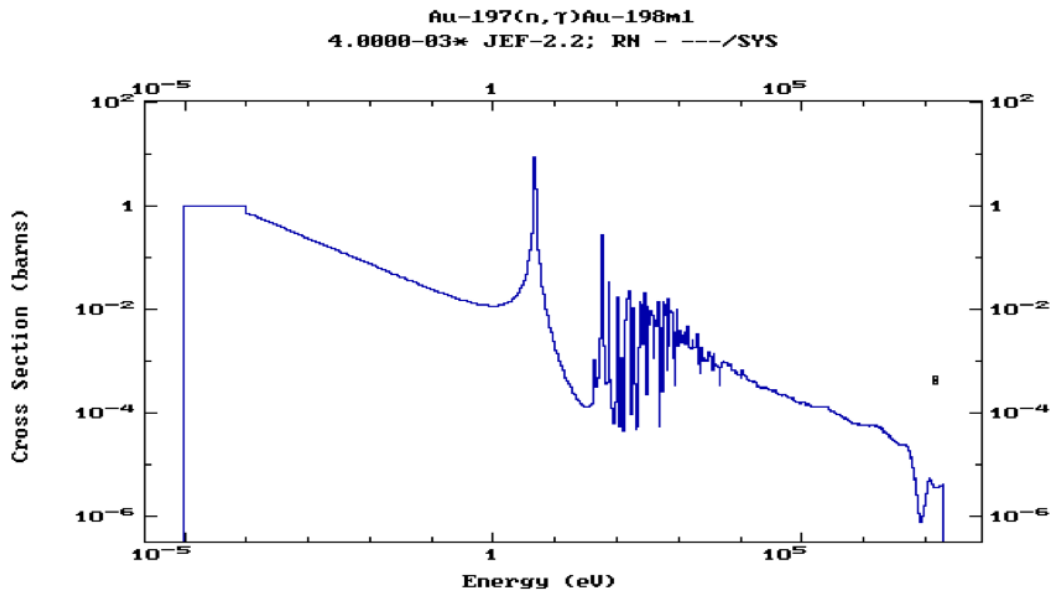


Figura 3.1: Secção eficaz de captura de neutrões para o ^{197}Au [14]

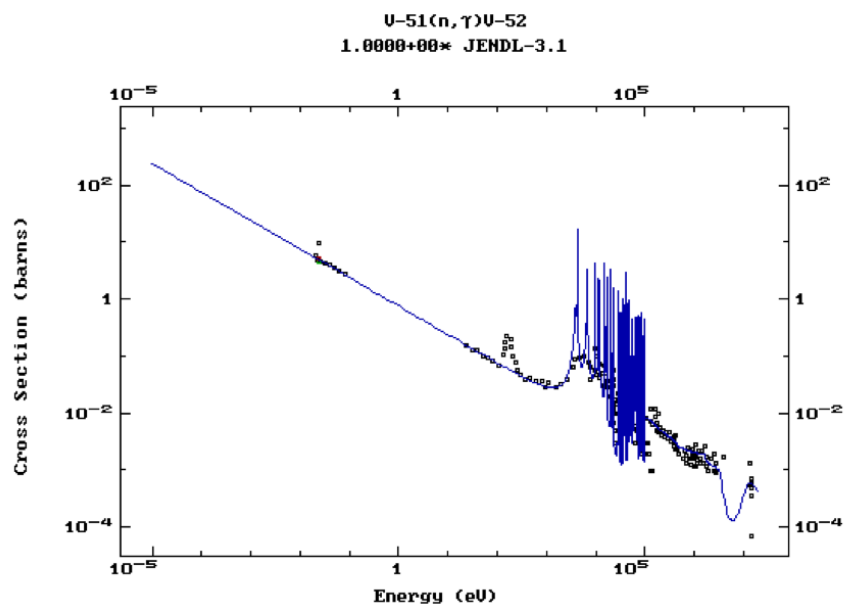


Figura 3.2: Secção eficaz de captura de neutrões para o ^{51}V [14]

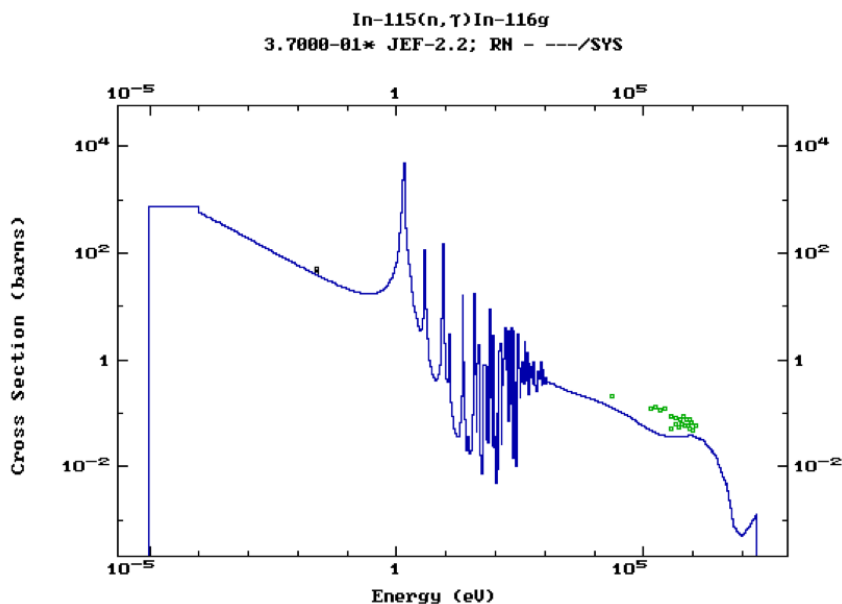
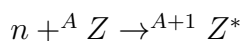


Figura 3.3: Secção eficaz de captura de neutrões para o ^{115}In [14]

3.2.1 Formação do núcleo composto

Se o neutrão incidente colide com o núcleo com um parâmetro de impacto, pequeno quando comparado com o raio nuclear, forma-se um estado intermédio, designado por núcleo composto:



que tem um tempo de vida média curto podendo decair de diferentes formas. Assume-se que a probabilidade relativa de decaimento para um dado estado final é independente da forma como se formou o núcleo composto. A probabilidade de decaimento depende unicamente da energia total fornecida ao sistema. A energia total disponível é a soma da energia cinética do neutrão incidente e do valor Q da reacção:

$$E_{total} = E_{neutroa} + Q$$

Sendo $Q = [massa({}^A Z) + massa(n) - massa({}^{A+1} Z)]c^2$, este valor de Q corresponde à energia de separação S_n do neutrão do núcleo ${}^{A+1} Z$.

Usando as leis de conservação de energia e momento linear para a reacção anterior, verifica-se que o núcleo composto é excitado para um nível cuja energia

é dada por:

$$E_{ex} = S_n + \frac{A}{A+1} E_n \quad (3.4)$$

sendo S_n a energia de separação do neutrão no núcleo ${}^{A+1}Z$ e E_n a energia cinética do neutrão incidente[15]

3.2.2 Ressonâncias

A probabilidade de formação do núcleo composto é superior para certos valores de energia do neutrão incidente. Estes valores correspondem a estados quase-ligados ou estados virtuais chamados de ressonâncias.

A secção eficaz total descreve a probabilidade de ocorrência do núcleo composto, podendo a forma de uma ressonância isolada ser descrita matematicamente pela fórmula de Breit-Wigner:

$$\sigma(E_n) = \frac{\pi}{K_n^2} g_n \frac{\Gamma_n \Gamma}{(E_n - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad (3.5)$$

sendo E_0 a energia de ressonância, e

$$g_n = \frac{2J+1}{(2s+1)(2I+1)}$$

é o factor de spin, sendo I o spin do núcleo alvo, J o spin do , núcleo composto e s o spin do neutrão, com:

$$K_n = 2.196771 \exp^{-3\frac{A}{A+1}} \sqrt{(E_n)}$$

e Γ a largura total a meia altura da ressonância e Γ_n a largura da dispersão do neutrão e corresponde à probabilidade de re-ejectar o neutrão incidente após a formação do núcleo composto. A largura total Γ representa a soma das larguras individuais de reacção, $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma + \Gamma_p + \dots$

3.3 Interação de neutrões com a matéria e processo de moderação de neutrões

Uma vez que os neutrões, são partículas neutras não sofrem desvios devido a perturbações eléctricas causadas, pela carga nuclear e cortejo electrónico dos átomos, interagindo directamente com o núcleo.

Desta forma apresentam na maior parte dos materiais, uma grande capacidade de penetrabilidade, sendo apenas detectados, de forma indirecta e partir de partículas carregadas secundárias geradas em reacções nucleares.

A interação neutrão núcleo acontece de forma geral, por intermédio de dois processos:

- Dispersão
- Absorção

A dispersão consiste na mudança de direcção após colisão do neutrão com o núcleo alvo, e pode ser:

- Dispersão Elástica (n,n)- nesta situação o núcleo não sofre nenhuma alteração estrutural e não se verifica qualquer transferência de energia para geração de radiação, existindo conversão de energia cinética e de momento linear, e verificando-se apenas transferência destas duas quantidades entre o neutrão e o núcleo. É esta a principal interação observada durante um processo de moderação.
- Dispersão inelástica (n, n', γ)- apenas ocorre para situações em que o neutrão apresenta energia superior ao limiar característico desta reacção para um dado material, verificando-se emissão de um neutrão de menor energia que o neutrão incidente, acompanhada muitas das vezes por emissão gama, resultante do processo de desexcitação nuclear. Não existe assim conservação de energia cinética e momento linear do sistema neutrão núcleo.

Na absorção e como atrás se referiu existe captura do neutrão e formação do núcleo composto, podendo ocorrer após a excitação nuclear, vários processos de acordo com a energia do neutrão e o núcleo alvo. No caso dos sistema multiesfera

de Bonner em análise e como adiante na análise das simulações efectuadas se verificará, o processo dominante será a captura radiativa, na activação dos núcleos que constituem o material detector. Considerando que o polietileno, usado como moderador, é constituído por hidrogénio e carbono, apresentando o carbono limiares superiores a 4 MeV para reacções inelásticas como $C(n, n'3\gamma)$, $C(n, \alpha)$, $C(n, n'3\alpha)$, $C(n,p)$ (15 MeV), $C(n, n'p)$, $C(n,p)$ [16], e atendendo a que o espectro de neutrões típico de um LINAC clínico para feixes de fótons de 15-18 MeV apresenta energias centradas na região dos 200-700 keV (com excepção da componente de extracção directa, a qual tem uma abundância muito reduzida), verifica-se um rácio de neutrões a prótons de um (resultado das simulações), o que confirma que no moderador, existe apenas dispersão de neutrões através das reacções elásticas $H(n,n)H$ e $C(n,n)C$.

Os neutrões podem ser classificados, de acordo com a sua energia como:

Designação dos neutrões	Intervalo de energia
<i>Térmicos</i>	E até 1 eV (obedece a uma distribuição de Maxwell-Boltzmann com máximo a 0.025 eV à temperatura ambiente)
<i>Epitérmicos</i>	E ~ 1 eV – 1 keV
<i>Lentos</i>	E ~ 1 keV – 100 keV
<i>Rápidos</i>	E ~ 100 keV – 10 MeV

Figura 3.4: Classificação dos neutrões de acordo com a sua energia

3.3.1 Moderação de neutrões

Considerando, que um dos aspectos essenciais na espectrometria de Bonner, consiste na moderação de neutrões, de forma a se “seleccionarem” dentro do espectro de neutrões característico dos LINAC’s, o grupo de neutrões que melhor

responde à condição de termalização para uma dada esfera do sistema multiesfera de Bonner, será feita uma revisão sumária do processo de moderação.

Quando os neutrões possuem energia inferior ao limiar das interacções inelásticas e uma vez que não interagem electricamente, o processo de perda de energia num dado meio é essencialmente de natureza cinemático, a partir de sucessivas colisões elásticas com os átomos constituintes do meio. Assim a diferença de massa entre os átomos do material moderador, e os neutrões surge como o principal parâmetro da eficiência de moderação. Pode-se ainda acrescentar, que para a conservação da fluência de neutrões é importante também a consideração da secção eficaz que o meio apresenta para a captura neutrónica.

Desta forma um bom moderador, apresenta por um lado elementos com baixa massa atómica, e por outro uma secção eficaz de captura neutrónica baixa, de forma a não se registar uma diminuição significativa da fluência de neutrões à medida que estes atravessam o meio moderador. Uma vez que no sistema multi-esfera de Bonner é utilizado como elemento moderador o polietileno, apresenta-se de seguida a secção eficaz de captura e de dispersão elástica para os seus constituintes:

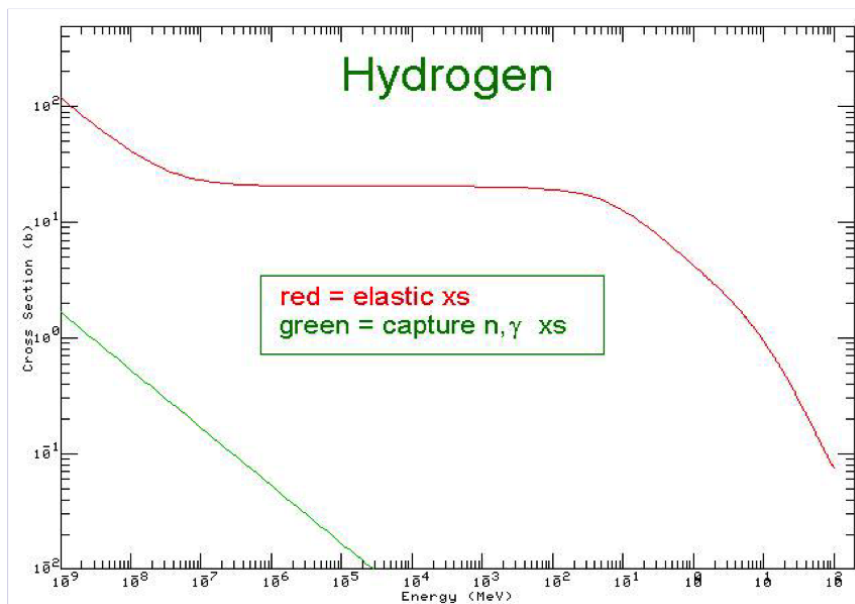


Figura 3.5: Secção eficaz de captura e dispersão de neutrões para o hidrogénio[17]

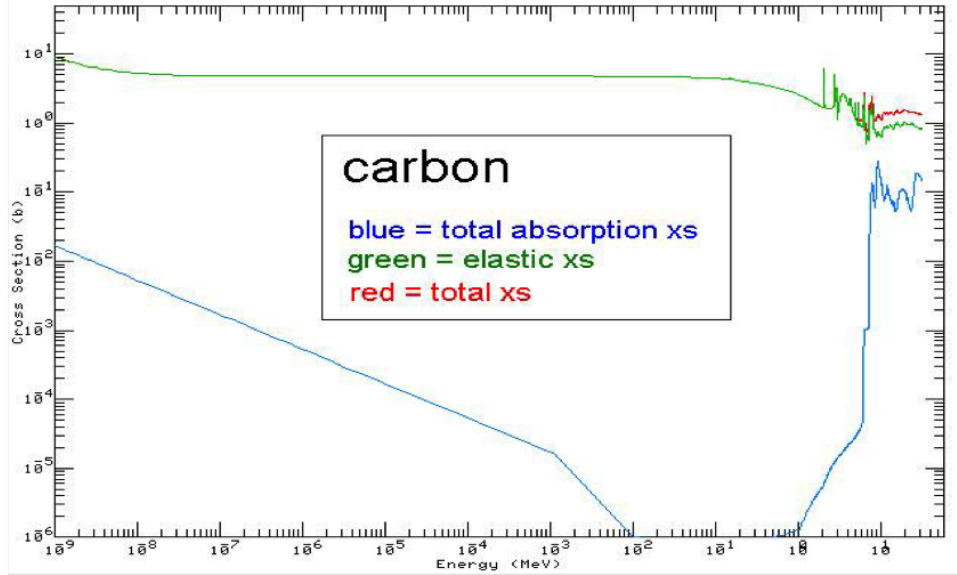


Figura 3.6: Secção eficaz de captura e dispersão de neutrões para o carbono[17]

3.3.1.1 Cinemática da moderação

Da análise da cinemática das colisões , deriva-se a expressão matemática que define a energia de um neutrão após uma colisão, como função do ângulo de impacto e da massa do núcleo dispersor:

$$E' = E \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \theta}{(A + 1)^2} \quad (3.6)$$

Assim para a colisão rasante, para $\theta = 0$ não se verifica perda de energia, e para a colisão frontal, com $\theta = 180$, verifica-se a perda de energia máxima, sendo por consequência definido a energia mínima do neutrão após uma colisão, com um núcleo dispersor de massa A, como:

$$E'_{min} = \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right)^2 E = \alpha E \quad (3.7)$$

e a fracção de transferência de energia máxima, como:

$$\frac{E - E'_{min}}{E} = 1 - \alpha \quad (3.8)$$

concluindo-se das expressões anteriores que a fracção máxima de transferência de energia é tanto maior quanto menor a massa do núcleo dispersor sendo máxima para $A=1$ (hidrogénio).

Definindo por outro lado, a perda logarítmica de energia como:

$$\mu = \ln E - \ln E' = \ln \frac{E}{E'} = \ln \frac{(A+1)^2}{A^2 + 1 + 2A \cos \theta} \quad (3.9)$$

obtem-se o parâmetro de moderação definido como a média da perda logarítmica:

$$\xi = \mu(\bar{\theta}) = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \quad (3.10)$$

O parâmetro de moderação como se observa da expressão anterior, é independente do valor de energia inicial do neutrão, sendo apenas função da massa do núcleo, e estima a perda logarítmica média de energia por colisão.

Considerando a média do $\cos \theta$, representando θ o ângulo de dispersão a cada colisão, como:

$$\nu = \bar{\cos \theta} = \frac{2}{3}A \quad (3.11)$$

e a secção eficaz macroscópica de dispersão (Σ_s), define-se o livre percurso médio do neutrão no meio moderador como:

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma_s(1-\nu)} \quad (3.12)$$

Para materiais constituídos por diferentes elementos, temos:

$$\nu = \frac{2 \sum \frac{N_i \sigma_s}{A_i}}{3 \sum N_i \sigma_s^i} \quad (3.13)$$

$$\xi = \frac{\sum N_i \sigma_s \xi_i}{i \sigma_s} \quad (3.14)$$

Representando N_i , o numero de átomos de cada elemento constituinte, por unidade de volume e Σ_s a secção eficaz de dispersão para os neutrões epitérmicos.

Aplicando ao polietileno obtém as seguintes quantidades, as quais nos permitem efectuar a sua caracterização enquanto moderador:

$$\lambda = 0.80910\text{cm} \quad e \quad \xi = 0.95$$

3.4 Produção de neutrões por fotoreacções nucleares

Num LINAC de uso clínico, com produção de feixes de fótons de energia superior a 10 MeV, verifica-se a partir de reacções fotonucleares, produção de partículas α , prótons e neutrões.

No entanto as primeiras, considerando a facilidade na sua blindagem não constituem de forma geral um problema. Relativamente à produção de neutrões, atendendo à dificuldade na sua blindagem, e que a sua energia para a fracção dominante do seu espectro, apresenta segundo a Comissão Internacional da Protecção Radiológica, um factor de ponderação (utilizado na cálculo da dose equivalente), que maximiza o efeito biológico, surge como uma fonte de contaminação importante.

Assim, os neutrões produzidos durante o funcionamento do LINAC, têm origem em reacções do tipo (e,n) e reacções do tipo (γ, n) . Como a primeira apresenta uma secção eficaz com duas ordens de grandeza inferior a segunda, considera-se desprezável.

Neste contexto sempre que os fótons incidentes apresentam energia superior ao limiar da reacção (γ, n) , verifica-se produção de neutrões. O limiar desta reacção, depende do número atómico do núcleo alvo, sendo de forma geral da ordem dos 8 MeV para materiais de elevado número atómico. Para materiais de baixo número atómico, o limiar da reacção de fotoprodução de neutrões é superior ao valor anteriormente apresentado, referindo-se e dada a importância destes dois elementos (no espaço de radioterapia), que para o oxigénio e carbono é respectivamente de 16 e 18 MeV.

Considerando estes aspectos, os neutrões produzidos em reacções fotonucleares, são na sua maioria, produzidos no alvo, colimadores e estrutura de blindagem, uma vez que estas estruturas, são constituídas por elementos de elevado número atómico como o tungsténio.

Na tabela seguinte apresenta-se para o modelo "Siemens Primus" a produção

relativa de neutrões para as várias estruturas e materiais que constituem o LINAC:

Location	contribution
primary collimator	54.85 %
MLC and jaws	26.72 %
target	10.08 %
target slide	5.64 %
flattening filter	1.74 %
bending magnet	0.61 %
steel block	0.13 %
steel and lead shield	0.11 %
x-low collimator	0.07 %
steel skeleton	0.03 %
absorber	0.01 %
steel plate	0.003 %
electronics	0.001 %
other	0.006 %

Figura 3.7: Produção parcial de neutrões para cada componente do LINAC Siemens Primus[18]

O espectro de energia dos fotoneutrões[19] produzidos, apresenta um fotópico característico dos espectros de evaporação nuclear, na região dos 200 - 700 keV e uma região de amplitude da ordem dos MeV, pouco abundante com origem nos neutrões resultantes da extracção directa. O principal processo de libertação de neutrões é então a ressonância dipolar gigante, apresentando os neutrões produzidos um espectro energético típico da evaporação nuclear.

3.4.1 Espectro de neutrões obtido no isocentro

Os seguintes espectros foram obtidos a 50 cm do isocentro, com a espectrometria de Bonner utilizando-se como elemento de activação o ^{197}Au , para feixes de diferentes energias, produzidos por diferentes LINAC's, em distintas salas de radioterapia,

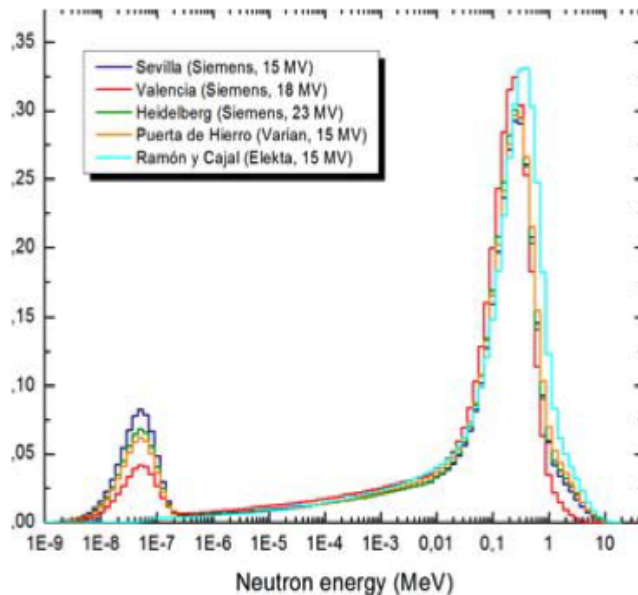


Figura 3.8: Espectros de nêutrons obtidos a 50 cm do isocentro para feixes de fótons de distintas energias[20]

Ambos os espectros apresentam as componentes típicas de um campo de nêutrons de uma sala de radioterapia, com:

- um pico de maior energia centrado em 0,2 MeV, originado pelos nêutrons (designados de primários) que são detectados antes de sofrerem qualquer dispersão,
- um pico centrado em 0,0025 eV, que traduz a fluência de nêutrons termalizados nas sucessivas dispersões elásticas com os constituintes do LINAC e das paredes da sala de radioterapia ,
- uma zona de nêutrons epitérmicos, com energias intermédias e de muito menor fluência

Da análise dos espectros observamos que:

- o facto da energia do pico de nêutrons primários não variar com a energia do feixe utilizado, sugere que o processo dominante da libertação de foto nêutrons é a evaporação nuclear,

-
- no isocentro existe uma maior fluência de neutrões primários, que se deve ao facto dos neutrões que chegam a esta zona não sofrerem muitas dispersões elásticas,
 - a abundância dos neutrões térmicos e epitérmicos é dependente das dimensões e materiais da sala de radioterapia, uma vez que resultam da moderação dos neutrões rápidos, libertados em fotoreacções nucleares,

Capítulo 4

Espectrometria de Bonner

Apesar de actualmente existirem outros métodos de monitorização de neutrões, a espectrometria de Bonner mantém especial destaque devido às seguintes características:

- permite detecção de neutrões com amplo intervalo de energia (desde térmicos até neutrões com energia da ordem dos GeV),
- permite utilizar uma grande variedade de sensores térmicos activos ou passivos, que se adequem às condições do espaço a monitorizar,
- apresenta uma boa discriminação, de possíveis campos de fotões existentes no espaço de monitorização, no caso de se utilizarem detectores passivos,
- apresenta facilidade no tratamento do sinal gerado,
- resposta isotrópica ao campo de neutrões, devido a simetria esférica dos detectores utilizados (esferas de polietileno, com sensor activo ou passivo de neutrões térmicos no centro desta),

As principais desvantagens, estão relacionadas com a fraca resolução que apresenta, e com a necessidade de um elevado tempo de irradiação, no caso de ser necessário irradiação individual das esferas.

Tendo em consideração, que no ambiente de radioterapia existem uma serie de condições que dificultam a utilização de detectores activos, como presença de campos electromagnéticos de elevada intensidade, originados no equipamento

de radiofrequência (Clistrão) do LINAC, e fundo de fótons intenso (dificulta a discriminação de fótons na detecção de neutrões), a espectrometria de Bonner com uso de detectores passivos, surge ainda na actualidade como uma técnica de eleição na monitorização de neutrões.

Ao longo deste capítulo, será feita uma breve apresentação da espectrometria de Bonner, das suas modalidades, do problema de desconvolução e do software FRUIT¹ [21] utilizado na determinação do espectro de energias que caracteriza o campo de neutrões.

4.1 Considerações gerais

De uma forma geral a espectrometria de Bonner consiste, numa série de esferas de material com elevado coeficiente de moderação de neutrões (como a parafina ou o polietileno), que possuem espessuras distintas e que contêm no seu interior um detector de neutrões térmicos o qual pode ser passivo ou activo. Assim conhecendo-se a função de resposta de cada esfera, a qual depende da espessura da esfera e da eficiência para neutrões térmicos do sensor utilizado, e a actividade de saturação para cada detector torna-se possível utilizando um código adequado determinar o espectro de neutrões.

Apesar de existirem vários códigos, para o processo de determinação do espectro de neutrões actualmente utiliza-se com maior frequência o FRUIT, que surge como uma evolução de códigos anteriores, e apresenta como principais vantagens, o facto de não necessitar de um espectro prévio e possuir um elevado nível de interactividade, permitindo que o utilizador visualize o processo de convergência, alterando se necessários os parâmetros desta.

As contagens C_i do detector de cada esfera (que no caso de se utilizar um elemento como detector passivo corresponde à actividade de saturação), quando expostas a um campo de neutrões expressam-se como:

$$C_i = \phi \int_{E_{min}}^{E_{max}} R_i(E) \varphi(E) dE \quad (4.1)$$

¹Frascati Unfolding Interactive Tool

sendo $R_i(E)$ a função de resposta de cada esfera expressa em cm^2 , φ a distribuição em energia da fluência de neutrões normalizada a $1 cm^2$, expressa em MeV^{-1} e ϕ a fluência de neutrões expressa em cm^{-2} .

O conjunto das m C_i que representam as m esferas (em campos de neutrões típicos dos LINAC's clínicos utilizam-se de forma geral 8) forma a matriz resposta. Colocando na forma discreta vem que:

$$C_i = \phi \sum_{j=1}^{N_g} R_{ij} \varphi \Delta E, \quad i = 1, \dots, m \quad (4.2)$$

Assim e conhecendo-se previamente a função de resposta R_{ij} , a determinação do espectro de neutrões consiste na inversão da matriz anterior (4.2), processo este conhecido por desconvolução espectral. No entanto dado que N_g é muito maior que m , ficamos com um problema indeterminado, o que implica que existe um número infinito de funções matemáticas que satisfazem a equação (4.2). Atendendo a que apenas algumas soluções são aceitáveis fisicamente, torna-se possível recorrendo a um código como o FRUIT determinar uma solução adequada.

4.1.1 Função de resposta

Os diferentes diâmetros das esferas que constituem o sistema multiesfera de Bonner, determinam que cada uma das esferas apresenta uma condição de termalização específica, condicionando que a função de resposta destas seja, apenas função da energia dos neutrões. Assim a resposta máxima, corresponde para cada uma das esferas à energia que melhor responde a sua condição de termalização.

Na figura seguinte ilustra-se a função de resposta para uma esfera com 8" de diâmetro, estimada a partir da simulação de Monte Carlo:

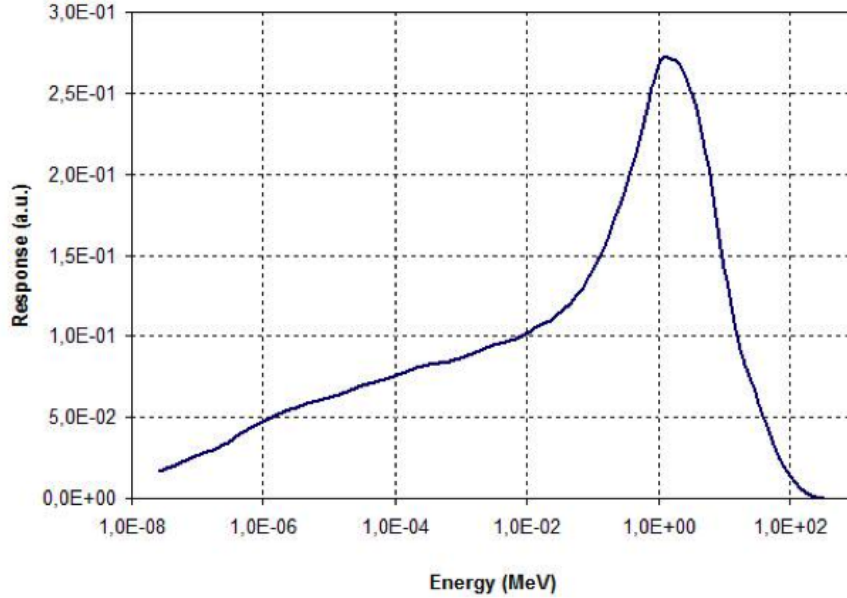


Figura 4.1: Função de resposta para uma esfera de 8''[22]

Da análise da figura 4.1, verifica-se que como seria de esperar, a função de resposta cresce gradualmente até se atingir a energia que melhor responde a condição de termalização da esfera, decrescendo de forma gradual para energias superiores a estas. Fisicamente temos então que neutrões com energia inferiores à energia que maximiza a função de resposta de uma dada esfera, tendem a ficar retidos no material moderador, e neutrões com energia superior tendem a atravessar o material moderador, sem serem termalizados.

A função de resposta de cada esfera é estimada a partir de simulações de Monte Carlo e confirmada experimentalmente em campos de neutrões de referência.

4.1.2 Processo de desconvolução

Como se referiu anteriormente, o facto do número de grupos de energia de neutrões, ser muito superior ao número de esferas utilizados, condiciona que o sistema que traduz as contagens para cada uma das esferas representado na equação (4.2) seja indeterminado.

Assim e atendendo a que apenas algumas das soluções matemáticas tem sig-

nificado físico, é possível recorrendo a software de cálculo numérico efectuar a desconvolução espectral.

Existem inúmeros códigos utilizados no processo de desconvolução, no entanto o FRUIT, dado apresentar um interface intuitivo, e não necessitar de um espectro prévio, é na actualidade um dos códigos mais utilizado.

O FRUIT é um código paramétrico, que gera através de simulação de Monte Carlo, um conjunto de parâmetros relacionados com o modelo físico que caracteriza o campo de neutrões a monitorizar. A cada iteração determina a partir destes parâmetros um espectro de neutrões, calculando a partir da equação (4.2) o número de contagens para cada esfera. O critério de convergência surge da comparação entre os contagens medidas e calculadas. Assim se $\varphi(E)$ é uma solução aceitável fisicamente, na próxima iteração um dos parâmetros utilizados para gerar os espectros é seleccionado e perturbado de forma aleatória, determinando-se um novo espectro que é comparado com o anterior através dos seguintes critérios de convergência:

Desvio para cada esfera

$$\xi_i^k = \frac{1}{\mu_i} |C_i - C_{i,k}^{calc}| \quad (4.3)$$

sendo μ_i a incerteza associada à medida das contagens para cada esfera e k a correspondente iteração.

Desvio médio

$$\delta^k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_i^k \quad (4.4)$$

sendo o processo repetido iterativamente até se atingir a tolerância definida.

4.1.2.1 Modos de Espectrometria de Bonner

Como se depreende do que anteriormente foi dito, a espectrometria de Bonner consiste de forma essencial, de um conjunto de esferas de diferentes diâmetros,

com um detector apenas sensível a neutrões térmicos colocados no seu centro. Assim e impondo através dos diferentes diâmetros, diferentes condições de termalização, torna-se possível após cálculo da função de reposta e medida das contagens em cada detector, determinar a partir da desconvolução o respectivo espectro de neutrões.

Atendendo as estes aspectos, a espectrometria de Bonner apresenta diferentes modalidades, que consistem de forma essencial na variação do número e diâmetro de esferas e detectores usados, de forma a se ajustar a diferentes amplitudes fluência e condições do campo de neutrões a monitorizar.

Os conjuntos de esferas mais utilizados, permitem monitorização de campo de neutrões com amplitude energética compreendida entre neutrões térmicos e neutrões com energia da ordem dos 20-30 MeV, estando documentadas as seguintes configurações:

- PTB, Braunschweig, Alemanha - Constituído por: detector, detector com filme de cádmio e detector colocado em 12 esferas de polietileno com os seguintes diâmetros: 3", 3.5", 4", 4.5", 5", 6", 7", 8", 10", 12", 15" e 18" (Alevra, 2002).
- configuração utilizada pela Universidade Autónoma de Barcelona, Espanha- constituído pelas esferas de polietileno com os seguintes diâmetros: 2.5", 3", 4.2", 5", 6", 8", 10", 12", e esferas com o seguintes diâmetros mais 1 mm de cádmio - 2.5" + 1 mm Cd, 3" + 1 mm Cd, 4.2" + 1 mm Cd (Lacoste, 2004).
- IRSN Cadarache, França- constituído por esferas de polietileno com os seguintes diâmetros 0", 2.5", 3", 3.5", 4.2", 5", 6", 7", 8", 9", 10", 11" and 12". Podem ser usadas 1 mm de cádmio nas 5 esferas de menor diâmetro (Lacoste, 2004).
- NPL Reino Unido: Constituído por detector sem esfera e detector colocado no centro de esferas de polietileno com os seguintes diâmetros: 2", 2.5", 3", 3.5", 4", 5", 6", 8", 10" and 12" (Thomas D. J., 2002).

4.1.2.2 Detectores usados em espectrometria de Bonner

Os detectores térmicos usados em espectrometria de Bonner, podem ser activos ou passivos. De uma forma geral, os detectores activos são utilizados considerando a sua maior sensibilidade, em campos de neutrões de baixa intensidade. Por outro lado, dada a sensibilidade destes à radiação gama intensa, e a perturbações electromagnética, não podem ser utilizados em espaços onde existam campos electromagnéticos pulsados ou radiação gamma de fundo intensa, privilegiando-se para estas condições o uso dos detectores passivos.

São utilizados de forma frequente em espectrometria de Bonner os seguintes detectores activos:

- O cintilador cilíndrico 4 mm x 4mm ${}^6\text{LiI}(EU)$ - A elevada secção eficaz do ${}^6\text{Li}$ para neutrões térmicos (940 barn a 0.025 eV) associada, a uma elevada densidade em LiI, faz com que este detector apresente, uma grande eficiência para neutrões térmicos. Considerando também as suas reduzidas dimensões, possibilita o uso em configurações que incluam esferas de diâmetros mais reduzidos como as de 2", 2.5" e 3". Apresenta como principal desvantagem, o facto da elevada densidade de elementos com numero atómico elevado (I), condicionar uma sensibilidade significativa a fotões, não sendo assim adequado a espaços com radiação de raios-X de fundo elevada, como é o caso das salas de radioterapia.
- contador proporcional com ${}^3\text{He}$ - tipicamente com geometria cilíndrica de 10 mm X 9 mm, apresenta um sensibilidade para neutrões térmicos cerca de duas vezes superiores ao anterior, com uma reduzida sensibilidade para fotões,
- contador esférico SP9 - Apresenta uma sensibilidade cerca de 5 vezes superiores ao detector anterior, no entanto o facto de apresentar um diâmetro de 3.2 cm, impede a sua utilização em configurações que incluam as esferas de menor diâmetro.
- cintiladores orgânicos, utilizados em campos de neutrões de elevada energia, associados a aceleradores de partículas carregadas, estando o seu mecanismo

de detecção associado a activação do carbono $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$, reacção caracterizada por um limiar de 18 MeV.

Como tem sido referido, para cenários com elevado fundo de fótons, ou elevado ruído electromagnético, os detectores anteriores apresentam perturbações significativas, sendo necessário o uso de detectores passivos. Os detectores passivos mais utilizados são os TLD (detectores termoluminescentes) e os detectores de activação como por exemplo as folhas de ouro. Os detectores passivos tem como principal desvantagem, a baixa sensibilidade necessitando de forma geral de elevados tempo de exposição, o que não constitui um problema de maior, uma vez que estes não requerem qualquer equipamento electrónico associado.

De uma forma geral o detector passivo de activação, que é utilizado na BSS¹, não é mais do que um elemento que apresenta uma elevada secção eficaz de captura para neutrões térmicos, sendo o processo de determinação do espectro de neutrões baseado, na inversão analítica das técnicas de activação. Assim, conhecendo-se a activação resultante da amostra, através de medidas da actividade que esta apresenta no caso dos isótopos criados serem instáveis, e conhecendo as grandezas que caracterizam as taxa de activação, torna-se possível a inferência do campo de neutrões.

Os elementos utilizados como detectores passivos, reúnem então, de forma preferencial as seguintes características:

- secção eficaz de captura de neutrões térmicos elevada,
- isótopos resultantes da activação radioactivos, e com esquemas de decaimento adequado, a uma fácil determinação da actividade de saturação,
- a medida da actividade é de forma geral feita, para decaimento β ou decaimento γ ,
- de acordo com o campo de neutrões a monitorizar, são escolhidos parâmetros de activação que optimizem o desempenho do elemento com sensor,

¹Bonner sphere spectrometer

-
- os elementos resultantes do estudo analítico, previamente efectuado neste trabalho (apresentado no capítulo 6), surgem como um exemplo das características que estes devem apresentar, em função do equipamento previsto para o setup experimental definido, dos objectivos da monitorização e das características do campo e das condições do espaço de monitorização.

Capítulo 5

Simulação e análise de dados

Como se tem referido, com esta trabalho pretende-se por um lado, dar ênfase ao problema da contaminação neutrónica que se verifica em certas técnicas radioterapêuticas, e por outro, efectuar revisão da espectrometria de Bonner em modalidade passiva, efectuando-se posteriormente a sua optimização através da selecção de elementos alternativos ao ^{197}Au , que a optimizem nos seguintes aspectos:

- diminuição do tempo de determinação do espectro de neutrões, através do uso de um elemento que apresenta após a irradiação uma elevada actividade, permitindo assim uma determinação mais rápida da actividade de saturação para cada uma das esferas que constitui o sistema multiesfera de Bonner,
- possibilidade de sucessivas medidas do espectro de neutrões, com o mesmo detector, com intervalos de tempo curtos através do uso de um elemento, com semi-vida curta, que condicione uma rápida queda da actividade da amostra utilizada como detector.

Neste sentido serão efectuadas nos capítulos posteriores, as seguintes simulações:

- estimativa da eficiência de activação, para diferentes geometrias da amostra utilizada como detector, de forma a se definir a geometria que optimiza a função de resposta para cada um dos possíveis elementos (resultantes do es-

tudo analítico prévio) utilizados como detectores passivos na espectrometria de Bonner,

- simulação das actividade para diferentes esferas, e para um feixe representativo do espectro de neutrões típico dos LINAC's clínicos, de forma a se ponderar, qual o elemento que melhor responde aos requisitos anteriores,
- simulação de uma sala de radioterapia, com o LINAC em funcionamento com feixe de fotões de 18 MeV, de forma a se averiguar a existência de diferenças significativas, na fluência de neutrões sobre as esferas de Bonner, quando estas são colocadas no isocentro de forma isolada, ou em conjunto, com o objectivo de se averiguar a possibilidade de irradiação simultânea.

Na realização das referidas, simulações foi utilizado, o FAIROOT, que surge como um ambiente, baseado em ROOT- VMC (Virtual Monte Carlo), que possibilita efectuar simulação e análise da dados de forma integrada. Por outro lado o VMC¹, possibilita o uso de diferentes códigos de simulação de Monte Carlo como, o Geant4, Geant3 e Fluka.

Assim ao longo deste capítulo, será efectuada uma breve abordagem, relativa à simulação de Monte Carlo, e à utilização do FAIRROOT para simulação de Monte Carlo, dos sistemas referidos, recorrendo-se ao Virtual Monte Carlo.

5.1 Simulação utilizando código Monte Carlo

Dado o aumento significativo que se tem verificado nos últimos anos, na capacidade de computação e na sua acessibilidade, a simulação surgiu ao logo dos últimos anos, nos vários domínios da física como um campo de grande interesse. De uma forma geral os códigos que utilizam computação de Monte Carlo, são baseados na amostragem (utilizando geradores de números aleatórios), aleatória de distribuições de probabilidade, que traduzem a interacção dos vários aspectos considerados na simulação do sistema em análise.

Com o aumento dos eventos simulados, e considerando a média destes como o comportamento que é estimado para o sistema em análise, tem se verificado

¹Virtual Monte Carlo

uma concordância progressiva do comportamento estimado por simulação, com o comportamento observado experimentalmente.

O método de Monte Carlo foi desenvolvido pelo grupo de cientistas do Projeto Manhattan, que trabalhou nos anos 40, no desenvolvimento de armas nucleares.

A denominação do método é atribuída a Nicholas Metropolis que, ao escolher o nome do famoso casino, destacou a relação entre as técnicas de amostragem estatística e os jogos de azar.

A primeira formulação de um algoritmo aplicando técnicas de Monte Carlo para cálculo em computador resultou de uma carta enviada por John Von Neumann a Robert Richtmyer, em março de 1947, propondo o uso de um método estatístico para resolver problemas de difusão e multiplicação de neutrões associados a processos de fissão nuclear.

O método tornou-se uma ferramenta utilizada nos mais diversos campos como a física, matemática, finanças, etc. No estudo do transporte de radiação, uma grande contribuição foi proporcionada por Kahn, ao apresentar a técnica de amostragem sobre a fórmula de Klein- Nishina, que permitiu a completa simulação da dispersão Compton [23].

A simulação de Monte Carlo, revela-se como um método de grande interesse, em situações onde dada a complexidade do sistema a simular, os métodos baseados em modelos determinísticos se mostram insuficientes.

De uma forma sucinta na simulação de Monte Carlo, os eventos com probabilidade de acontecerem num dado processo são sequencialmente seleccionados, a partir da amostragem estatística da distribuição da probabilidade que representa um dado fenómeno, descrevendo-se assim de forma gradual o fenómeno na sua totalidade. O processo de amostragem como se referiu é baseado na geração de números aleatórios.

No caso da simulação do transporte de radiação, é então efectuado o percurso de muitas partículas, desde a sua origem (fonte definida para a simulação), até ao seu "final", ponto correspondente a captura ou escape do volume definido na simulação, sendo os "passos" de simulação definidos pela amostragem aleatória das distribuições que traduzem os processos de interacção das partículas e materiais envolvidos na simulação, e sendo registado para cada passo de simulação parâmetros como momento, posição etc, definindo-se assim a história da partícula.

A imagem seguinte ilustra o processo de simulação de Monte Carlo, para um neutrão a incidir sobre uma amostra de material cindível:

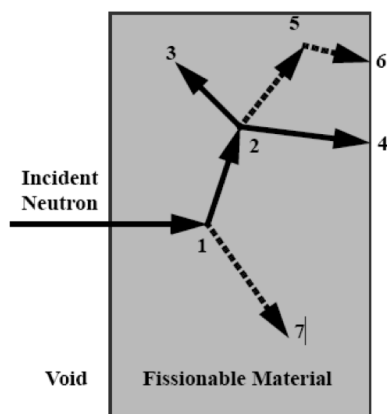


Figura 5.1: Exemplo da história de um evento simulado com código Monte Carlo

Representando na história do evento:

- 1- Dispersão do neutrão incidente e produção de um fóton
- 2- fissão com produção de um fóton
- 3- captura de um neutrão
- 4- fuga de um neutrão do volume em análise
- 5- dispersão de um fóton
- 6- fuga de um fóton
- 7- captura de um fóton

5.2 Virtual Monte Carlo

As simulações efectuadas ao longo desta tese, foram efectuadas em FAIR-ROOT, que surge como uma plataforma, onde são definidos todos os módulos

auxiliares à simulação, existindo a possibilidade de efectuar a “chamada “ em ambiente virtual de vários códigos como Geant3, Geant4, Fluka, para simulação de transporte de radiação, para as condições e geometrias definidas.

O pacote de software FAIRROOT utiliza bibliotecas do programa ROOT¹. Com esta ferramenta, o utilizador tem a possibilidade de simular e analisar os dados apenas com um único framework. Suporta os mecanismos de transporte do GEANT² nas versões 3.21 (Fortran) e 4 (C++) sem que o código dependa em particular de um mecanismo de transporte Monte Carlo específico. Apresenta uma base de classes implementadas, que permitem a criação de detectores ou fazer análise de dados de uma forma simples, além de oferecer opções de visualização das geometrias criadas e dos eventos gerados pela simulação.

O Root [24] é o resultado de um Projecto desenvolvido a partir de 1995 no CERN - European Organization for Nuclear Research, por René Brun e Fons Rademakers, sendo criado para substituir as antigas plataformas feitas em Fortran, de forma a se aumentar a eficiência de análise da imensa quantidade de dados que seriam gerados pelo Large Hadron Collider – LHC. Surge como um ambiente de análise de dados estruturado em orientação por objectos e escrito em C++, que contém uma serie de classes e métodos que embora sejam mais direccionadas, para analisar dados obtidos em experiências de Física de partículas, dado as suas grandes capacidades de análise e de visualização gráfica, lhe permitem, uma fácil adaptação à análise de dados em outros campos.

As bibliotecas de base do FAIRROOT incluem:

- Uma estrutura comum, de análise e simulação baseada em "Root Trees",
- uma descrição das geometrias utilizadas comum, baseada no modulo "Root Geometry",
- um interface para diferentes códigos de simulação Monte Carlo utilizando, o pacote Virtual Monte Carlo,
- Classes de base para construção de detectores, com inclusão do processo de inicialização, construção dos volumes definidos, e processamento dos eventos

¹Um programa orientado a objectos e uma biblioteca desenvolvida no CERN

²GEometry ANd Tracking (software de simulação desenvolvido no CERN)

simulados,

- Formatos de entrada das geometria em: Ascii, Root e STEP(CAD),
- Visualizador de eventos, baseado em Eve (ROOT) e Geane,
- Macros escritos em Root, para configuração dos diferentes códigos de Monte Carlo integrados no VMV.

Capítulo 6

Seleccção dos elementos alternativos ao ^{197}Au e definição da geometria da amostra

No início do desenvolvimento do presente trabalho, estava previsto uma componente experimental, a qual não foi efectuada, por problemas de ordem técnica (sucessivas falhas de funcionamento do LINAC) exteriores aos trabalhos inerentes ao desenvolvimento da presente tese. Neste contexto, estava previsto, a medida do espectro de neutrões do LINAC presente nas instalações do ITN, para irradiações com feixes de fótons de energia de 12 MeV, a partir da espectrometria de Bonner com utilização do elemento resultante do estudo analítico e simulações, como detector passivo.

Como é sabido, a medida de actividade de saturação, inerente às técnicas de monitorização de neutrões por métodos indirectos como a análise da taxa de activação, não tem de ser de forma exclusiva efectuada a partir da análise da actividade gama, podendo no caso do elemento formado apresentar decaimento β —ser efectuada a partir da análise do respectivo espectro de electrões. No entanto e considerando os aspectos anteriores (componente experimental prevista), e que todo o trabalho efectuado considerou como referência o ^{197}Au (toda a bibliografia consultada determinava a actividade de saturação a partir da análise do fotópico de 411 keV), foi inicialmente previsto para medida da actividade de saturação

um setup experimental constituído por um detector HPGe ¹, para medida da actividade gama da amostra.

Assim, as ponderações dos resultados das estimativas analíticas da taxa de activação, utilizadas na selecção dos elementos, foram dirigidas para a actividade gama que resultaria da activação, considerando-se também a eficiência do setup previsto para os picos de raios X, analisados.

Será então abordado ao longo deste capítulo, numa primeira parte a estimativas analíticas e as respectivas ponderações efectuadas na selecção dos elementos, numa segunda parte será efectuada referência aos procedimentos previstos para a medida da actividade de saturação da amostra, e numa última parte feita referência ao processo de activação e da sua influência na definição da geometria e volume da amostra, apresentando-se posteriormente os resultados das estimativas que evidenciam a optimização da resposta para a geometria adoptada, bem como os resultados das simulações efectuadas.

6.1 Considerações gerais

Na determinação do espectro de neutrões o ²FRUIT apenas requer o ambiente físico em que é gerado o campo de neutrões (de forma a estabelecer o grupo de parâmetros adequados à sua simulação), as funções de resposta de cada esfera, e no caso de se utilizar um elemento de activação como detector passivo, a actividade de saturação verificada para cada esfera no final da irradiação, com as respectivas incertezas associadas.

Tendo em consideração que a utilização dos detectores activos em campos de neutrões gerados por um LINAC é limitada pelos seguintes aspectos:

- A existência de campos electromagnéticos de alta frequência, originados pela ³RF geram ruído electrónico significativo,
- Dada a importância terapêutica do isocentro, torna-se necessária a monitorização do campo de neutrões neste ponto. No entanto atendendo à

¹High-Purity Germanium detector

²Frascati Unfolding Interactive Tool

³Sistema de geração de radiofrequência (a frequência utilizada na maioria das configurações dos LINAC's clínicos é de cerca 2998 MHz)

elevada intensidade de radiação de raios-X presente no isocentro, torna-se difícil com detectores activos discriminar a detecção de neutrões do campo de raios X,

Utilizam-se de forma preferencial os detectores passivos, os quais consistem de um elemento que quando exposto ao campo de neutrões no interior de cada esfera sofre activação. Como a medida da actividade é feita posteriormente e noutro espaço a partir da análise do esquema de decaimento do isótopo resultante da activação, evitam-se os condicionamentos anteriores.

Assim o detector passivo utilizado em espectrometria de Bonner consiste num elemento, que detenha as seguintes características:

- Secção eficaz de captura de neutrões térmicos, e tempo de semivida adequados a uma boa activação, com a fluência característica dos campo de neutrões observados numa sala de radioterapia,
- Isótopo resultante da activação, com um esquema de decaimento que facilite a medida da actividade,

Nos artigos e bibliografia consultados [25] [20] [26], foi utilizado como detector o ^{197}Au , o qual quando colocado no centro de cada esfera é activado de forma predominante por neutrões térmicos para o ^{198}Au . Da análise do esquema de decaimento do ^{198}Au , observamos que decai por β^- para o ^{198}Hg num estado excitado, apresentando no seu processo de desexcitação nuclear, um fotopico com 411 keV com intensidade adequada a uma boa medida da actividade.

6.2 Parâmetros utilizados na selecção dos elementos

Na activação de um elemento exposto a um campo de neutrões consideram-se os seguintes processos:

- Produção do isótopo, em resultado da reacção (n,X),
- Decaimento do isótopo, com a correspondente constante de declínio λ ,

Assim a actividade da amostra para um dado tempo de irradiação, pode ser estimada por:

$$A = S(1 - \exp^{-\lambda t_{irr}}) \quad (6.1)$$

representando t_{irr} o tempo de irradiação e S a actividade de saturação definida como:

$$S = N\sigma\Phi \quad (6.2)$$

sendo N o numero de átomos da amostra, σ a secção eficaz de captura e Φ a fluência de neutrões.

Na caracterização dos elementos utilizaram-se os seguintes grupos de parâmetros:

- *Parâmetros utilizados na ponderação da activação do elemento:*
 - Secção eficaz de captura de neutrões térmicos,
 - Tempo de semi-vida,
 - Abundância isotópica relativa,

- *Parâmetros utilizados na ponderação da estimativa da actividade gama:*
 - Modo de decaimento e percentagem,
 - No caso de existir possibilidade de o núcleo ser activado para um estado que possa ter decaimento por transição isomérica, foi feita análise do spin nuclear do elemento utilizado e dos estados finais após activação, de forma a ponderar a ocupação relativa dos estados. Assim se a diferença de spin nuclear do núcleo inicial e do estado do núcleo activado que decai por transição isomérica for muito maior que a diferença de spin entre o núcleo inicial e o estado do núcleo que decai por

modo β , considera-se que o povoamento para o estado que decai por transição isomérica é desprezável,

- Intensidade do gama seleccionado,
- Eficiência do detector para a energia do gama seleccionado,

Na tabela seguinte apresentam-se os elementos seleccionados e os respectivos parâmetros:

Elemento irradiado	Spin/paridade	Spin/paridade Elemento final	Ponderação activação			Ponderação actividade gama					
			σ (E=0,0025 ev)/barn	$t_{1/2}$ (min)	abundancia (%)	M. decaimento	%	Transição isomérica e Spin	Energia (kev)	%	Eficiência Detector (HPGE)
²⁰⁵ Tl	1/2+	0-	0,11	4,2	70	β -	100	12-	803	0,005	0,04
²⁰⁴ Hg	1/2+	1/2+	0,4	5,2	6,9	β -	100	13/2+	203,8	2,2	0,1
¹⁹⁷ Au	3/2+	2-	98,7	3881	100	β -	100	12-	411,8	80	0,07
¹⁸⁶ W	0+	3/2-	37	1440	29	β -	100	não	479,5	26,6	0,06
¹³⁹ La	7/2+	3-	8,9	2405	100	β -	100	não	487	45	0,06
¹¹⁵ In	9/2+	6+	81	55	96	β -	100	8-	1293	84	0,03
¹³⁸ Bq	0+	7/2-	0,36	83,1	72	β -	100	não	165	23,7	0,11
¹²⁷ I	5/2+	1+	6,2	24,9	100	β -	93,2	não	442	12,8	0,06
⁸¹ Br	3/2-	5-	2,4	2117	49	β -	100	2-	554	71	0,06
⁷⁵ As	3/2-	2-	4,5	1574	100	β -	100	não	559	45	0,06
⁷¹ Ga	3/2-	3-	4,7	846	40	β -	100	não	834	95	0,04
⁶⁵ Cu	3/2-	1+	2,17	5,1	31	β -	100	não	1039	92,3	0,04
⁶³ Cu	3/2-	1+	4,5	762	69	β -	61,5	não	511	35,2	0,06
⁶⁴ Ni	0+	5-	1,55	151	0,9	β -	100	não	1115	15	0,03
⁵⁵ Mn	5/2-	3+	13,3	154	100	β -	100	não	846	98,9	0,04
⁵¹ V	7/2-	3+	4,9	3,75	100	β -	100	não	1434	100	0,03
⁴¹ K	3/2+	2-	1,46	742	6,7	β -	100	não	1524	18	0,03
⁴⁰ Ar	0+	7/2-	0,66	109	100	β -	100	não	1293	99,1	0,03
³⁷ Cl	3/2+	2-	0,43	37,2	34	β -	100	5-	1642	33	0,03
³⁶ S	0+	7/2-	0,24	5,05	0	β -	100	não	30103	94	0,02
³⁰ Si	0+	3/2+	0,107	157	3,1	β -	100	não	1266	0,7	0,03
²⁷ Al	5/2+	3+	0,23	2,24	100	β -	100	não	1778	100	0,02
²⁶ Mg	0+	1/2+	0,038	9,45	11	β -	100	não	842	71	0,04
²³ Na	3/2+	4+	0,43	894	100	β -	100	1+	1368	99	0,03

Figura 6.1: Elementos seleccionado e respectivos parâmetros de ponderação

6.2.1 Dados e cálculos utilizados na estimativa da actividade dos elementos

Foram utilizados os seguintes dados:

- densidade dos elementos (g/cm^3)
- Massa molar (g/mol)
- amostra com $2 \times 2 \text{ cm}^2$ de área e 0,1 cm de espessura, assumindo-se que a fluência de neutrões é constante ao longo da superfície da amostra
- Foram retirados do espectro de neutrões consultados[20], a fluência por Gy do pico dos neutrões rápidos, do pico dos neutrões térmicos e do patamar dos neutrões epitérmicos, de forma a se estimar a actividade conseguida para as três regiões que caracterizam o espectro típico do isocentro, para um feixe de 15 MeV.
- Tendo em consideração que a fluência de neutrões é apresentada por unidade de dose, sendo utilizados nos estudos consultadas irradiações correspondentes a 1000 MU¹ e variando as taxas de dose debitadas de acordo com o LINAC utilizado entre 200 MU/min-600 MU/min, os tempos de irradiação utilizados na estimativa da actividade, do presente trabalho foram:
 - 2 minutos de forma a adaptar o tempo de irradiação, aos LINAC's com taxas de dose próximas da taxa máxima,
 - 4 minutos de forma a adaptar o tempo de irradiação, aos LINAC's com taxas de dose próximas da taxa mínima,
 - Estimaram-se as a actividades da amostra após a irradiação, 10, 20 e 30 minutos após ter decorrido a irradiação.

e realizados os seguintes cálculos:

¹Unidade Monitor- Para uma dada energia, o LINAC é calibrado de forma a que 1 MU, corresponda a uma dose absorvida de 1 cGy à profundidade de dose máxima para uma SSD (source skin distance) de 100 cm

-
- *número de átomos presentes na amostra*

$$N = \sigma At N_{adv} M \quad (6.3)$$

representando A e t respectivamente a área e a espessura da amostra

- *Actividade gama para cada tempo de irradiação*

$$A_0 = N \Phi (1 - \exp^{-\lambda t_{irr}}) I e f A \quad (6.4)$$

representando I a intensidade do gama seleccionado para o decaimento, ef a eficiência do detector para a energia do gama seleccionado e A a abundância do isótopo.

- *Actividade para 15, 20 e 30 minutos após a irradiação*

$$A = A_0 \exp^{-\lambda t} \quad (6.5)$$

6.3 Resultados analíticos e discussão

Nos seguintes gráficos apresentam-se os resultados da actividade em gama estimada a partir dos cálculos anteriores:

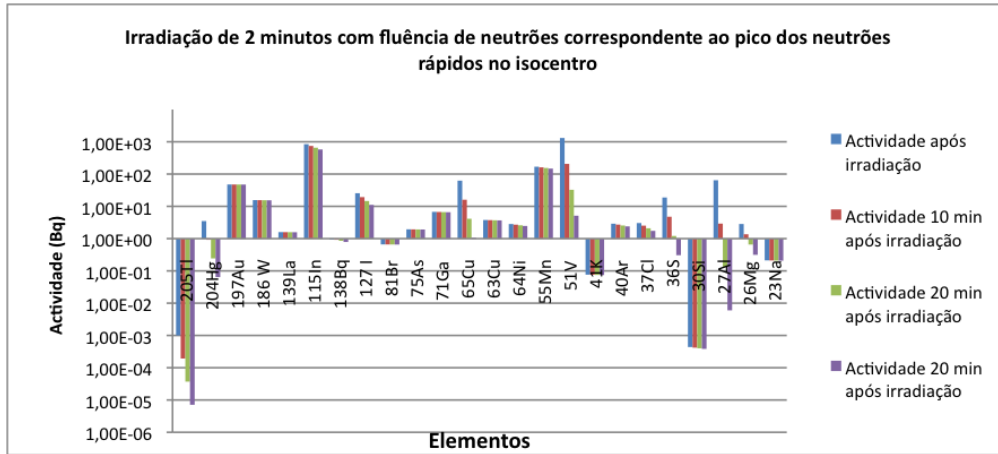


Figura 6.2: Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 2 minuto com fluências características dos pico dos neutrões rápidos no isocentro

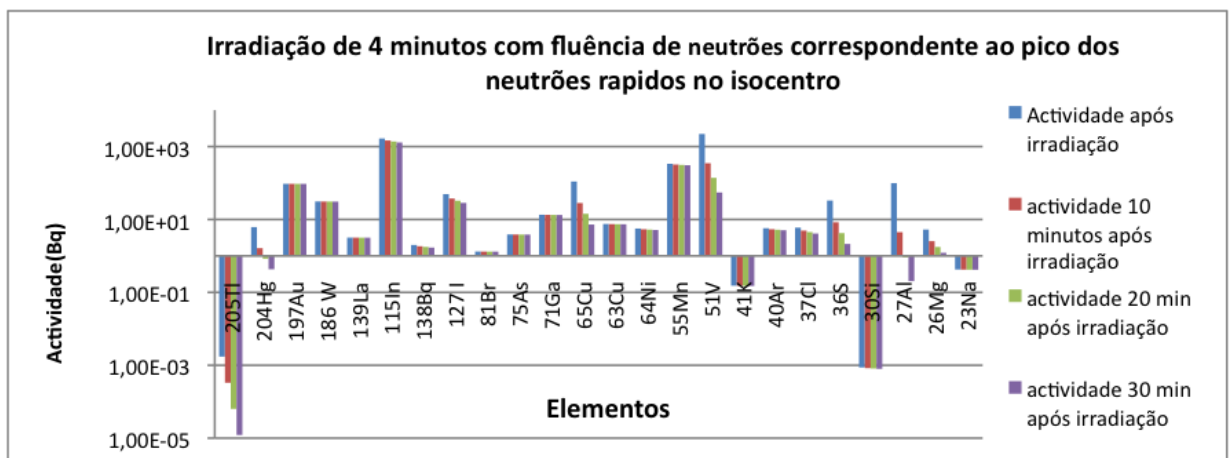


Figura 6.3: Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 4 minutos com fluências características dos pico dos neutrões rápidos no isocentro

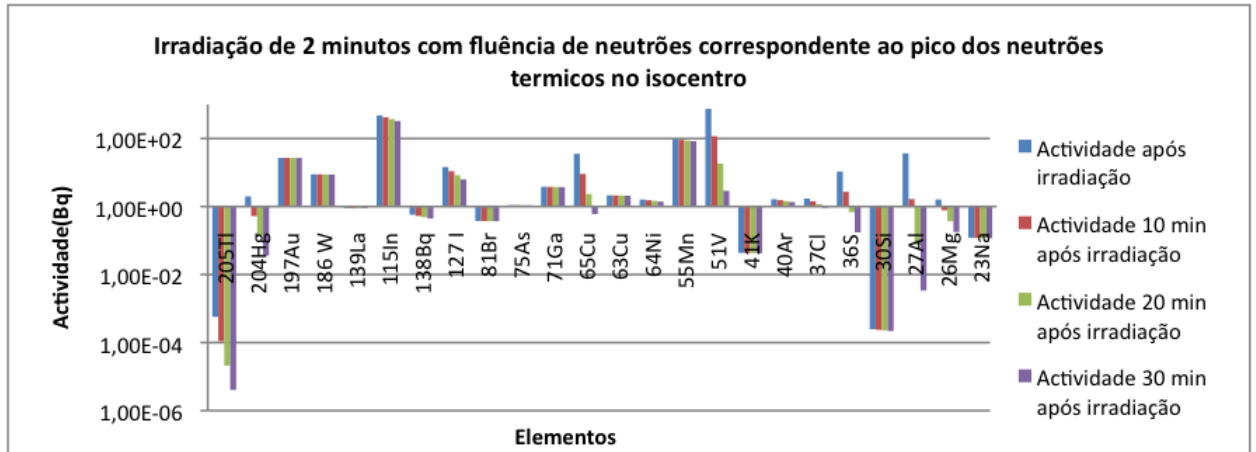


Figura 6.4: Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 2 minutos com fluências características dos pico dos neutrões térmicos no isocentro

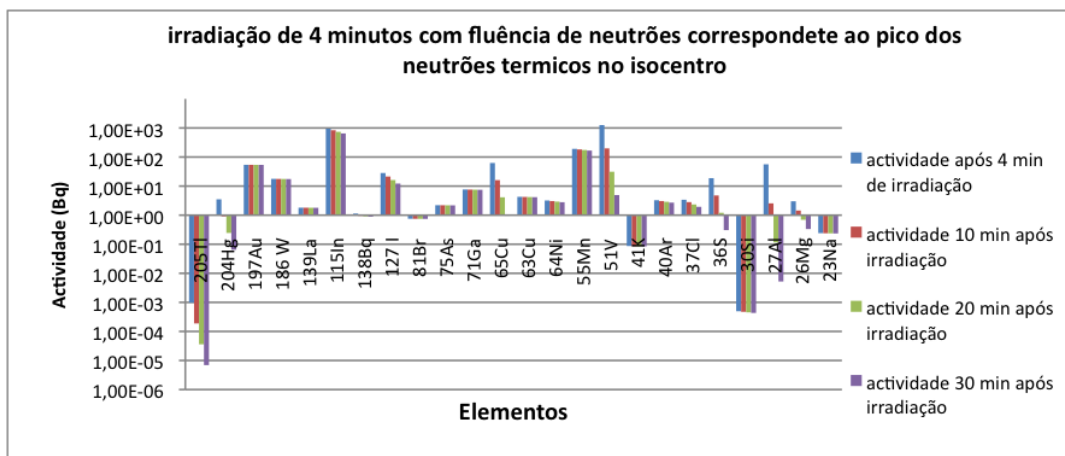


Figura 6.5: Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 4 minutos para fluências características dos pico dos neutrões térmicos no isocentro

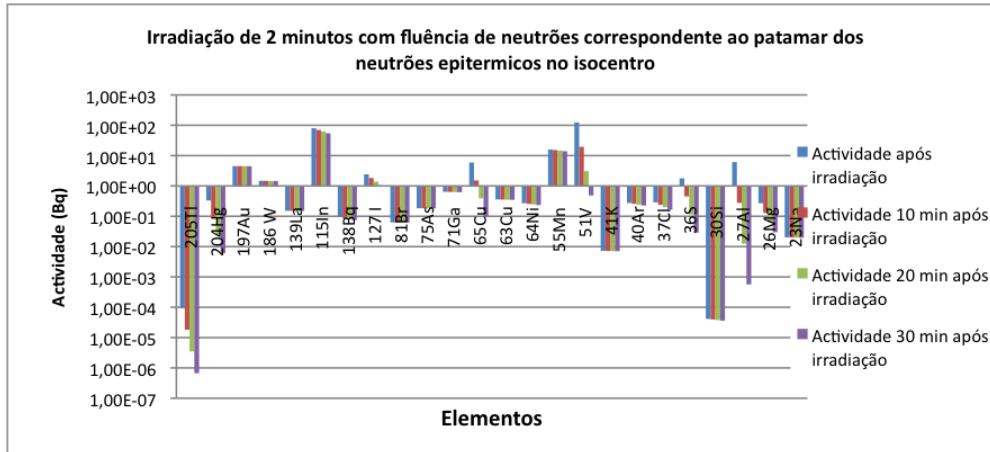


Figura 6.6: Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 2 minutos para fluências características do patamar dos neutrões epitérmicos no isocentro

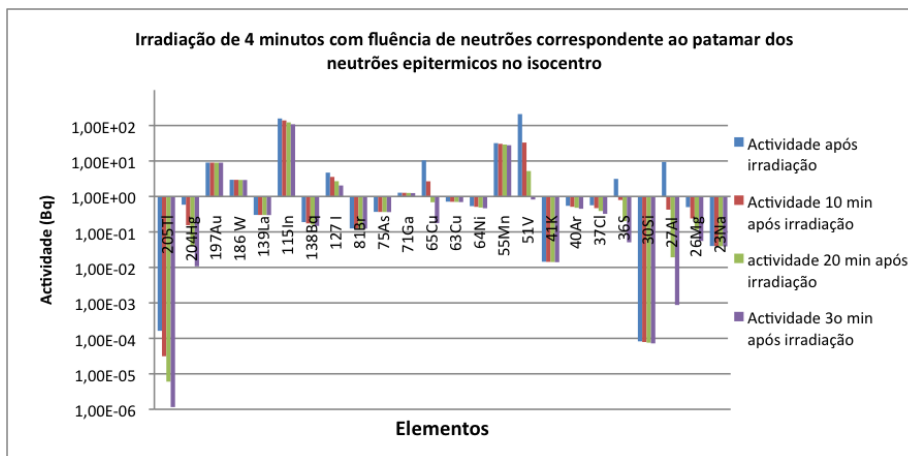


Figura 6.7: Estimativa da actividade gama, dos diferentes elementos, para uma irradiação de 4 minutos para fluências características do patamar dos neutrões epitérmicos no isocentro

Das ponderações das estimativas analíticas, retiram-se as seguintes conclusões:

- O ^{115}In e o ^{55}Mn apresentam para todas as fluências de neutrões, tempos de irradiação e de decaimento, uma actividade superior à prevista para o ^{197}Au ,

-
- O ^{116}In permite transição isomérica, sendo a diferença de spin deste estado com o spin do ^{115}In $7/2$, enquanto que a diferença de spin do núcleo inicial para o ^{116}In no estado em que se verifica decaimento β^- é $3/2$, o que implica um povoamento deste ultimo estado muito mais provável, considerando-se o efeito da transição isomérica na actividade gama que se pretende medir desprezável,
 - O ^{116}In apresenta uma semivida de 55 minutos enquanto o ^{198}Au apresenta uma semivida de 3881 minutos. Assim com o ^{115}In consegue-se uma maior activação, uma maior actividade gama e um menor tempo de determinação desta, melhorando-se a técnica previsivelmente nos dois primeiros pontos propostos. No entanto por apresentar uma semivida ainda relativamente longa, não me parece que seja adequado ao aumento da disponibilidade do equipamento em tempo útil, por manter uma actividade residual importante,
 - O ^{55}Mn , embora apresente melhoria relativamente ao ^{197}Au , nos aspectos analisados no ponto anterior, em nenhum deles acrescenta melhoria relativamente ao ^{115}In , pois apresenta uma menor activação, e o ^{56}Mn apresenta menor actividade gama e um tempo de semivida (cerca de 154 min) maior que o ^{116}In .
 - Da análise do ^{51}V , observa-se que apresenta um actividade 10 minutos após a irradiação, para todas as fluências e tempos superior a do ^{197}Au , e da mesma ordem de grandeza dos elementos anteriores. Assim se existirem condições experimentais para inicio da aquisição de dados, nos 10 minutos após irradiação, este elemento parece reunir os requisitos para a melhoria da técnica nos três pontos propostos, uma vez que o ^{52}V apresenta uma semivida de apenas 3,75 minutos, o que condiciona uma rápida queda de actividade da amostra.

6.4 Processo de activação

Como foi referido, para a determinação do espectro de neutrões, recorrendo-se à espectrometria de Bonner, com utilização de um detector passivo, é necessário medir a actividade de saturação (neste estudo a actividade gama) da amostra, as incertezas associadas, e previamente calcular as funções de resposta para cada esfera. Com este conjunto de dados, é utilizado software de cálculo numérico (como FRUIT), que permite de forma iterativa e por convergência sucessiva determinar o espectro, processo este conhecido como desconvolução.

De acordo com estes aspectos será ao longo deste ponto, feita uma breve revisão acerca dos processo de activação, e da forma de determinação da actividade de saturação.

6.4.1 Activação da amostra quando sujeita a um campo de neutrões

Um campo de neutrões é caracterizado, por um espectro que representa a fluência destes em função da energia. Assim a taxa de fluência total para um dado ponto, do respectivo campo de neutrões é matematicamente expressa como:

$$\phi = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \psi(E) dE \quad (6.6)$$

sendo expressa em neutrões. $cm^{-2}.s^{-1}$ e representando $\psi(E)$ a taxa de fluência diferencial ou unitária expressa em neutrões. $cm^{-2}.s^{-1}$.

Quando uma amostra constituída por N átomos de um dado elemento é, exposta a um campo de neutrões, a taxa de activação deste elemento é expressa como:

$$\frac{dn}{dt} = N\bar{\sigma}\phi - n\bar{\sigma}_s\phi - n\lambda \quad (6.7)$$

representando, $\bar{\sigma}$ a secção eficaz média de captura de neutrões do elemento para o espectro considerado, $\bar{\sigma}_s$ e λ respectivamente a secção eficaz média de captura e constante de decaimento para o elemento que resulta da activação.

De igual modo a taxa de consumo de átomos do alvo é expressa como:

$$\frac{dN}{dt} = -N_0 \bar{\sigma} \phi \quad (6.8)$$

resultando após integração da relação anterior:

$$N = N_0 \exp^{-\bar{\sigma} \phi t} \quad (6.9)$$

Das relações de 6.7 e 6.9, considerando $\bar{\sigma} \ll \lambda$ e $\bar{\sigma}_s \ll \lambda$, e após as manipulações algébricas necessárias (utilizando a técnica do factor integrante), resulta:

$$\frac{d}{dt} [n \exp^{(\bar{\sigma}_s \phi +)t}] = \bar{\sigma}_s \phi N_0 \exp^{[(\text{sigm}a_s \phi + \lambda)t + \bar{\sigma} \phi t]} \quad (6.10)$$

vindo assim:

$$A_0 = \Sigma_{act} \phi V (1 - \exp^{-\lambda t}) \quad (6.11)$$

sendo $A_0 = n\lambda$ a actividade da amostra após um determinado tempo de irradiação, e $\Sigma_{act} = N\sigma$ a secção eficaz macroscópica média para o espectro de neutrões considerado, e V o volume do alvo. Esta expressão, permite relacionar o número de radionuclídeos formados, com o tempo de irradiação.

Pela análise da equação anterior, verificamos que para tempos de irradiação superiores a 5 tempos de semi-vida do isótopo formado se atinge praticamente a actividade de saturação definida como:

$$A^\infty = \Sigma \phi V \quad (6.12)$$

6.4.2 Determinação da actividade de saturação

De acordo com às considerações anteriores a actividade da amostra (A_0), utilizada como detector passivo, após um tempo t_0 de exposição a uma dada fluência de neutrões pode se expressa como:

$$A_0 = A^\infty (1 - \exp^{-\lambda t}) \quad (6.13)$$

representando A^∞ a actividade de saturação da amostra.

Assim e considerando que os radionuclídeos formados começam de forma imediata a decair (com a respectiva constante de decaimento) após irradiação, na prática e no processo de medida da actividade de saturação do detector, não se irradia este até se atingir a sua actividade de saturação mas apenas durante o tempo necessário a que a amostra adquira uma actividade adequada, à medida experimental.

Após determinação da actividade A_0 , a actividade de saturação é calculada utilizando a expressão anterior.

6.4.2.1 Determinação da actividade A_0

Na figura seguinte, representa-se a actividade de uma amostra (a qual pode ser utilizada como detector passivo), quando exposta a um campo de neutrões:

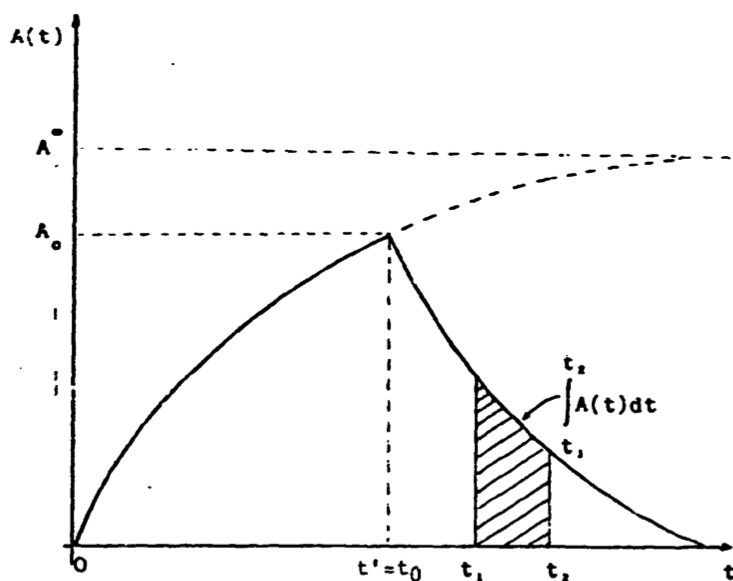


Figura 6.8: Actividade da amostra durante e após o tempo de irradiação

Da sua análise verificamos:

- a actividade aumenta até t_0 (irradiação), período que corresponde ao tempo de exposição da amostra ao fluxo de neutrões.

-
- para um tempo de irradiação superior a cerca de cinco semividas do radionuclídeo formado, seria praticamente atingida a actividade de saturação (representada na figura a tracejado)
 - após o tempo de irradiação, t_0 a actividade da amostra diminui ao longo do tempo de acordo com a constante de decaimento, do radionuclídeo que resulta da activação,
 - a actividade acumulada entre t_1 e t_2 é expressa como:

$$C_{ac} = \epsilon I \int_{t_1}^{t_2} A_o \exp^{-\lambda t} + BG \quad (6.14)$$

representando ϵ a eficiência do detector para a energia do fotópico, I a abundância do fotópico e BG a radiação de fundo no intervalo $t_1 - t_2$

resolvendo o integral anterior (6.14) vem:

$$C_{ac} = \frac{\epsilon A_o I}{\lambda} (-\lambda t_1 - \exp^{-t_2}) \quad (6.15)$$

colocando $\exp^{-\lambda t_1}$ em evidencia obtém-se:

$$C_{ac} = \frac{\epsilon A_o I}{\lambda} \exp^{-\lambda t_1} (1 - \exp^{-(t_2-t_1)}) + BG \quad (6.16)$$

sendo t_1 o tempo de irradiação t' acrescido do tempo de espera t_e , que antecede o início da medida da actividade, e $t_2 - t_1$ o tempo de medida.

Assim substituindo A_0 pela expressão (6.13), e considerando que:

$$\exp^{-t_1} = \exp^{-t_2} \exp^{-\lambda t_e} \text{ com } \exp^{-\lambda t'} = 1 \quad (6.17)$$

define-se a expressão que permite o cálculo da actividade de saturação:

$$A^\infty = \frac{\lambda(C_{ac} - BG) \exp^{\lambda t_e}}{\epsilon I(1 - \exp^{-\lambda t_0})(1 - \exp^{\lambda t_e})} \quad (6.18)$$

Assim após definição do tempo de contagem, de acordo com a actividade gama que a amostra apresenta, a determinação do fundo para a actividade do

pico seleccionado, e sabendo a abundância para esse mesmo fotópico, determina-se a partir da expressão anterior a actividade de saturação da amostra.

6.5 Definição do volume e geometria da amostra

Como foi dito pretende-se ponderar a utilização da espectrometria de Bonner, com um elemento usado como detector passivo, que apresente uma boa taxa de activação, mas que apresente também um tempo de semi-vida curto de forma a se poderem fazer, no caso de se utilizarem os módulos auxiliares (material cintilador, electrónica mais código e equipamento de processamento) integrados no sistema multiesfera, medidas de espectros de neutrões sucessivas, tendo-se apenas como condicionamentos, a necessidade de desligar a electrónica auxiliar, durante o tempo de irradiação, e um tempo de espera para nova medida, estimado em cerca de 5 semi-vidas do elemento que resulta da activação.

Atendendo a estes aspectos, torna-se necessário utilizar um volume de amostra, que contenha um número de átomos suficientemente elevado, por forma a que a função de resposta das esferas não seja alterada após algumas irradiações.

Assim será ao longo deste ponto efectuada a análise, do volume da amostra necessário e da geometria que optimiza o processo de activação.

6.5.1 Processo de activação e fluxo neutrónico nas camadas interiores do alvo

Para um mesmo volume de amostra, na definição da geometria que optimiza a eficiência do processo de activação neutrónica, tem de se considerar o efeito de auto- protecção do alvo[27].

De uma forma geral, o efeito de autoprotecção é provocado pelo facto do alvo ter uma dada dimensão finita, de onde resulta que a taxa de interacção neutrónica varia com a penetração dos neutrões no seu interior. Assim o valor médio do fluxo de neutrões no alvo, é inferior ao fluxo na superfície em consequência das camadas mais superficiais “protegerem” as camadas mais internas. Para um dado número de átomos, quanto maior for a espessura da superfície perpendicular ao fluxo de neutrões maior será o efeito de auto-protecção e menor será por consequência a

eficiência de activação.

O efeito de autoprotecção é matematicamente definido como:

$$G = \frac{\phi}{\phi_s} \quad (6.19)$$

com ϕ representando o fluxo no interior do alvo e ϕ_s o fluxo na superfície do alvo.

Na tabela seguinte apresenta-se o factor de autoprotecção, para diferentes espessuras e raios, para as 3 geometrias usualmente utilizadas em problemas de activação:

x	G₀ folha x=tΣ_a	G₀ cilindro x=2RΣ_a	G₀ esfera x=2RΣ_a
0.01	0.9723	0.9934	0.9963
0.02	0.9516	0.9870	0.9925
0.05	0.9016	0.9682	0.9815
0.10	0.8371	0.9388	0.9635
0.20	0.7403	0.8850	0.9288
0.50	0.5568	0.7531	0.8351
1.00	0.3903	0.5960	0.7073
2.00	0.2349	0.4071	0.5273
5.00	0.0998	0.1932	0.2770
10.00	0.0500	0.0992	0.1470

Figura 6.9: Factor de auto protecção para diferentes diâmetros e espessuras

Representando, t a espessura para as folhas, R o raio para a esfera e a flha e Σ_a a a secção eficaz macroscópica de captura neutrónica.

Assim em termos práticos, para um volume de amostra fixo, quanto menor o factor de autoprotecção (G), para a geometria adoptada, ou variação da espessura, ou diâmetro dentro de uma mesma geometria, menor será a eficiência de activação.

6.5.2 Definição do volume da amostra

Retomando a ideia, de que um dos motivos da presente tese, esta relacionado com a averiguação, da possibilidade da utilização, da espectrometria de Bonner em modalidade passiva, em medidas sucessivas, em “quase tempo real” do espectro de neutrões presentes numa sessão de radioterapia, torna-se necessário ponderar, a quantidade de amostra a utilizar como detector, de forma a que o consumo de átomos nas sucessivas irradiações, não altere a probabilidade de activação e por consequência a função de resposta, para cada uma das esferas que constitui o sistema multiesfera de Bonner .

Na bibliografia consultada, a geometria da amostra utilizada é de forma geral a folha. Será de seguida e utilizando os dados da dimensão das amostras consideradas na bibliografia [28][17], feita a estimativa do numero átomos consumidos a cada irradiação, e para um dado padrão e período estipulado de utilização do equipamento.

Foram utilizados os seguintes dados, efectuados os seguintes cálculos e presumidas as seguintes condições (tendo em consideração que interessa, com esta estimativa garantir que a função de resposta para as várias esferas não se altere dentro de um dado período de utilização, serão adoptadas condições ideais de forma a se sobrestimar o consumo):

Condições:

- Atendendo a que activação, dos elementos considerados é feita de forma essencial, por neutrões térmicos, e considerando que para as esferas de menor diâmetro, os neutrões rápidos do espectro que caracteriza, o campo de neutrões típico de LINAC's clínicos, não serão termalizados e por isso têm elevada probabilidade de escapar do volume de moderação, e que para as esferas de maior diâmetro, os neutrões térmicos e epitérmicos, terão grande probabilidade de ficar retidos no polietileno, consideraremos para estimativa do fluxo de neutrões térmicos que chega ao centro da esfera (com o pres-

suposto de sobrevalorizar a estimativa) o integral do pico de maior fluência do espectro de neutrões característico do LINAC.

- Consideraremos que activação é apenas, efectuada a partir da absorção de neutrões térmicos,
- A incidência dos neutrões térmicos será considerada uniformemente distribuída na superfície da amostra,

Dados:

- Elementos considerados o ^{197}Au , o ^{51}V , e o ^{115}In
- Folha como geometria,
- integral do pico de maior fluência - $8.25 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- dimensões da amostra - raio 1 cm, espessura 0.01 cm
- padrão de utilização do equipamento- num período de 5 anos 3 vezes por hora, 8 horas por dia, -(8640 irradiações)

Cálculos efectuados

- $x = a * \Sigma_a$
utilizado na ponderação do factor de autoprotecção através dos valores apresentados na tabela 6.9, sendo a a espessura da amostra no caso de se utilizar a folha como geometria ou o raio no caso de se utilizar como geometria a esfera (uma vez que se pretende colocar a mostra no centro da esfera de Bonner, por uma questão de simetria apenas serão efectuadas ponderações para a folha e esfera como possíveis geometrias a adoptar), e representando Σ_a a secção eficaz macroscópica.
- N^0 de átomos consumidos por irradiação (como foi dito, pretende-se com estas estimativas garantir que o consumo de átomos estimado é maior do que o real, por isso também aqui por simplicidade se estima para o fluxo considerado os átomos consumidos para uma situação em que se atinge a actividade de saturação, em vez do número de átomos para o tempo de

irradiação):

$$N = \frac{A^\infty}{\lambda}$$

representando A^∞ a actividade de saturação e λ a constante de decaimento para cada elemento.

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados, das estimativas efectuadas:

Elementos	Nº átomos	Cons atomos\irrad	Consumo Átomos 8640 irradiações	Factor autoprotecção esfera	Factor autoprotecção folha
¹⁹⁷ Au	9.31 E20	4.24E10	3.66E14	0.3	0,98
¹¹⁵ In	6.02E20	3.35E8	2.89E12	0.45	0.98
⁵¹ V	1.26E21	4.57E7	3.95E11	0.8	0.98

Figura 6.10: Estimativa do consumo de átomos e factores de autoprotecção para os diferentes elementos e geometrias

Verifica-se assim, que mesmo com a utilização de um fluxo de neutrões térmicos sobrestimado, e com a ponderação dos átomos consumidos para tempos de irradiação de forma a se atingir em cada medida, a actividade de saturação, que para o volume da amostra considerada, e após 8649 utilizações, a amostra ainda apresenta um número de átomos da mesma ordem de grandeza que o número de átomos inicial para todos os elementos. Assim podemos concluir, que as dimensões da amostra apresentadas, são suficientes para garantir que a função de reposta não se altere ao longo das sucessivas irradiações.

6.5.3 Optimização da geometria da amostra

Das estimativas efectuadas anteriormente e apresentadas em 6.2, verifica-se que para todos os elementos o factor de autoprotecção é maior para a folha do que para a geometria esférica, concluindo-se assim que analiticamente é de esperar maior eficiência na activação e por isso uma maior função de resposta para a folha, do que para a geometria esférica.

De forma a dar consistência à análise anterior, foi feita simulação da activação para as duas geometria e para todos os elementos utilizando-se um feixe de neutrões térmicos, e desenvolvendo-se neste contexto, código de análise centrado no registo dos 'prompt gamma' [29] de forma a se conseguir uma ponderação directa da activação (anexo 2). Os resultados das simulações mostraram que para todos os elementos, a folha apresenta uma taxa de activação superior à geometria esférica.

Os seguintes histogramas, representam a posição dos núcleos activados na amostra para cada um dos elementos e para cada uma das geometrias:

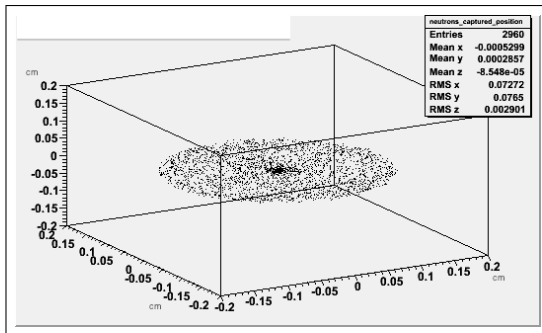


Figura 6.11: Activação do ^{197}Au para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra com geometria esférica

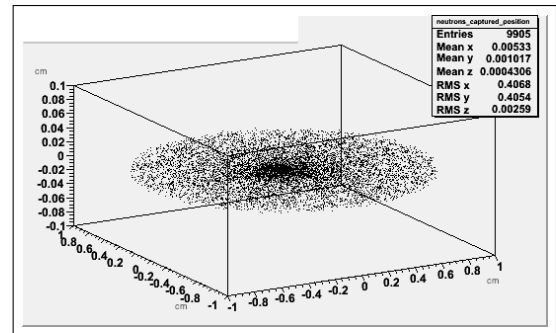


Figura 6.12: Activação do ^{197}Au para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra definido-se, a folha como geometria

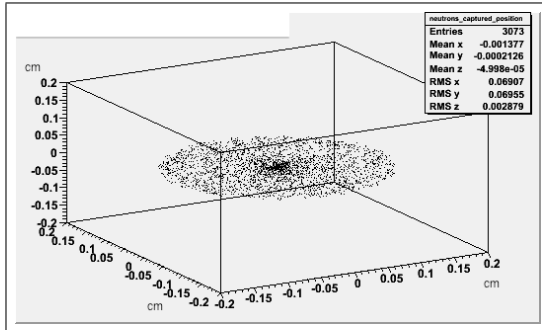


Figura 6.13: Activação do ^{115}In para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra com geometria esférica

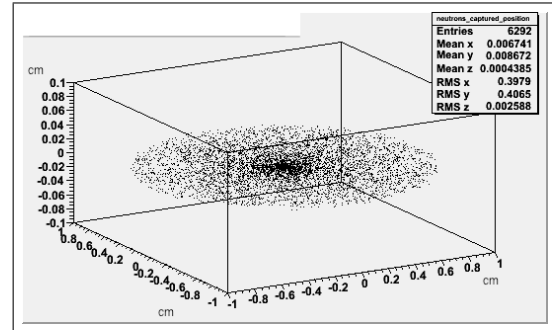


Figura 6.14: Activação do ^{115}In para um feixe de 100.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra, definido-se a folha como geometria

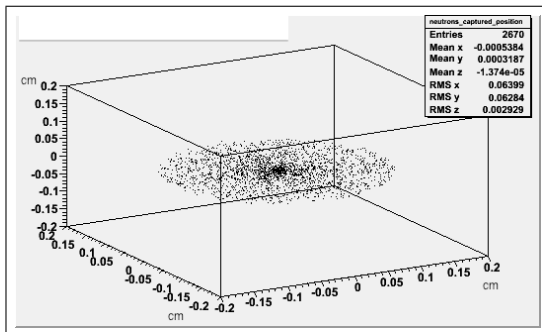


Figura 6.15: Activação do ^{51}V para um feixe de 400.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra com geometria esférica

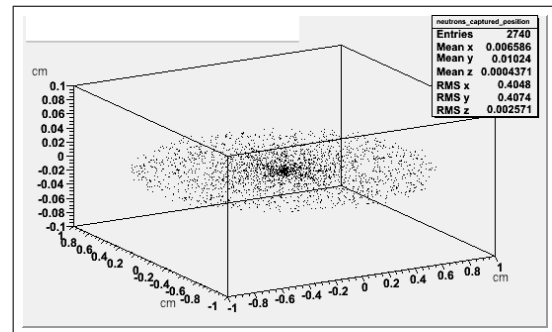


Figura 6.16: Activação do ^{51}V para um feixe de 400.000 neutrões com energia 0,0025 eV uniformemente distribuído sobre a superfície da amostra, definido-se a folha como geometria

De acordo com as considerações anteriores, será então definida como geometria para o detector passivo, da espectrometria de Bonner a folha.

6.5.4 Seleção do elemento a utilizar como detector passivo

Como tem sido referido, pretende-se com este trabalho averiguar a existência de condições, que permitam aplicar a espectrometria de Bonner em modalidade passiva, à monitorização de neutrões gerados por LINAC's em sala de radioterapia. Para esse efeito torna-se necessário por um lado o uso de um elemento como detector, que apresente uma boa taxa de activação, para as fluência de neutrões características destes espaços, e um tempo de semi-vida suficientemente curto, para que a actividade se torne residual poucos minutos após a irradiação. Por outro lado torna-se, necessário caracterizar o espectro de neutrões nas regiões onde se pretende efectuar as medidas, de forma a se verificar se as fluência sobre as esferas junto ao isocentro, não varia no volume ocupado pelo conjunto das esferas, possibilitando assim a irradiação simultânea das esferas.

Neste contexto, averiguamos que entre os elementos seleccionados após a ponderação das estimativas analíticas, apenas o ^{51}V , satisfaz o requisito da semivida suficientemente curta, que garanta uma actividade residual poucos minutos após a irradiação.

Assim serão feitas, simulações da actividade e da actividade acumulada ao longo dos 15 minutos após irradiação, de forma a se comparar a actividade para os diferentes elementos, e no caso como é de esperar, que o ^{51}V apresenta uma maior actividade, se ponderar também o tempo necessário de medida de actividade no ^{197}Au e ^{115}In , para um mesmo nível de contagens acumuladas, do ^{51}V .

Nas simulações efectuadas, consideraram-se os seguintes aspectos:

- foi utilizado um gerador com emissão de neutrões cuja a fluência espectral se aproxima do espectro característico gerado por um LINAC (anexo 4), para feixe de fotões de 15 MeV, e uniformemente distribuído sob a esfera utilizada, de forma a conseguir-se uma maior aproximação das condições reais.
- feitas simulações para as esferas de 2,5", 5" e 8", de forma a se efectuar ponderação da actividade para diâmetros representativos do conjunto de esferas utilizados no sistema multiesfera de Bonner (utilizou-se a esfera 8" e não a 12", porque dado que a função de resposta desta apresenta um máximo para energias superiores a 1 MeV, e considerando o número reduzido de

evento simulados (1.5×10^6 por comparação com as fluência reais 1×10^{12}) é de esperar que a taxa de activação para as esferas de 10" e 12" seja muito reduzida)

- considerando que o número de eventos é muito menor do que a fluência de neutrões por Gy documentada em trabalhos anteriores, foi considerado para ponderação das actividades um volume de amostra superior ao das estimativas anteriores. Assim adoptou-se como espessura 0,05 cm (valor estimado 0,01) e como raio 1.5 cm (1 cm nas estimativas anteriores).

A actividade para cada um dos elementos, e para as condições anteriores foi determinada a partir dos seguintes procedimentos:

- foi definida a fluência de neutrões sob a superfície do volume activo (anexo 2), definido um histograma com as energias dos neutrões que atravessam o volume activo, e feita posteriormente a convolução deste histograma com a secção eficaz correspondente para cada um dos elementos em análise. Desta forma determinou-se a actividade de saturação para a fluência de neutrões que alcança o volume activo.
- como se pretendia a actividade para cada um dos elementos e para cada uma das esferas para irradiações de quatro minutos, esta foi determinada a partir da seguinte expressão

$$A = S(1 - \exp^{-\lambda t_{irr}})$$

De forma a se efectuar uma ponderação mais precisa, a folha foi dividida em três secções de forma a se efectuar uma convolução das fluência como o numero de átomos mais efectiva (raio < 0.5, 0.5 < raio < 1, 1 < raio < 1.5). A figura seguinte ilustra para o ^{51}V e para a esfera 2,5" as fluência para diferentes secções energia e orientação da folha (neutrões incidentes na superfície orientada para o gerador, neutrões que sofrem retrodispersão, com incidência na amostra nos sentido oposto ao gerador):

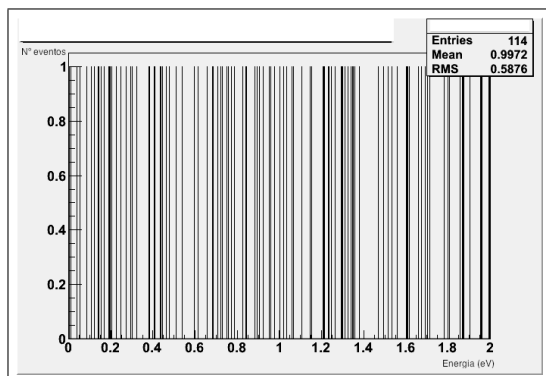


Figura 6.17: Histograma para a secção da folha com raio inferior a 1,5 cm e superior a 1 cm (exterior) e para neutrões com energia inferior a 2 eV

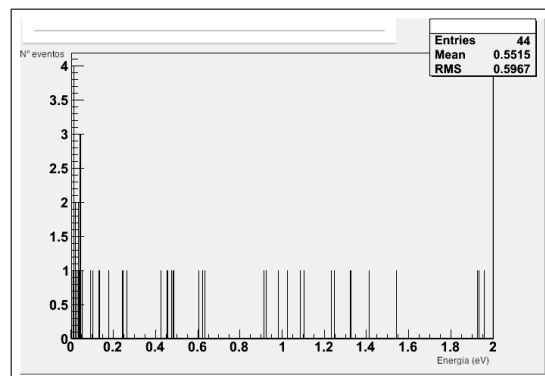


Figura 6.18: Histograma para a secção da folha com raio inferior a 0,5 cm (interior) e para neutrões com energia inferior a 2 eV

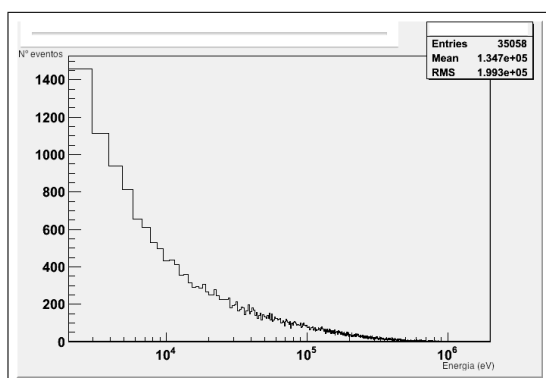


Figura 6.19: Histograma para a secção da folha com raio inferior a 1cm e superior a 0,6 cm e par neutrões com energia compreendida entre 2 keV e 2 MeV, com incidência na superfície da folha com orientação para o gerador de partículas

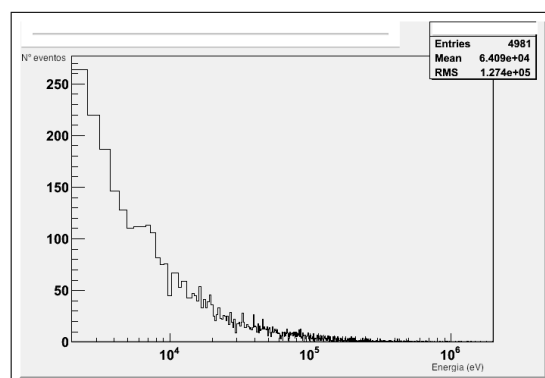


Figura 6.20: Histograma para a secção da folha com raio inferior a 1cm e superior a 0,6 cm e par neutrões com energia compreendida entre 2 keV e 2 MeV, com incidência na superfície da folha com orientação para o gerador de partículas

Calculou-se posteriormente a actividade após irradiação, o número de átomos

activados, as contagens acumulada nos primeiros 15 minutos (anexo 2), e actividade da amostra 15 minutos após a irradiação, apresentando-se os resultados na seguintes tabela:

	^{197}Au	^{115}In	^{51}V
Esfera de diâmetro 2.5'			
Actividade após irradiação _(Bq)	13.48	59.47	17606.7
Nº átomos após irradiação	4518571	297357	5741335
Contagens acumuladas 15'	12117	48690	4898348
Actividade após 15' _(Bq)	13.44	49.27	1114.36
Esfera de diâmetro 5'			
Actividade após irradiação _(Bq)	4.1	15.79	7330
Nº átomos após irradiação	1398078	78966	1245326
Contagens acumuladas 15'	3749	12930	1062478
Actividade após 15' _(Bq)	4.159	13.19	241
Esfera de diâmetro 8'			
Actividade após irradiação _(Bq)	0.596	2.90	845
Nº átomos após irradiação	199894	14505	143533
Contagens acumuladas 15'	536	2375	122475.94
Actividade após 15' _(Bq)	0.594	2.42	27.86

Figura 6.21: Resumo da actividade para os diferentes elementos

Das considerações anteriores, e apesar do número de eventos simulados, ser muito inferior ao valor de fluência neutrónica referenciado em bibliografia (1×10^{12} por Gy), não se podendo assim estimar com precisão a relação de tempo de aquisição entre os vários elementos, para um mesmo nível de contagens acumuladas verifica-se:

- O ^{51}V , é entre os elementos analisados, o único que apresenta após 15 minutos uma queda significativa do valor de actividade inicial,
- Para um mesmo tempo de aquisição, o ^{51}V apresenta um nível de contagens muito superior aos outros elementos,

Assim podemos concluir, que entre os elementos analisados, o ^{51}V é o único que viabiliza a utilização da espectrometria de Bonner em modalidade passiva, para monitorizações sucessivas.

Capítulo 7

Caracterização do espectro de neutrões no isocentro

No capítulo anterior definiu-se a geometria e o volume da amostra utilizada, como detector, que optimizam a função de reposta e garantem que esta não se altera, para um dado período e padrão de utilização. Mostrou-se que o ^{51}V , apresenta no período imediatamente após a exposição ao campo de neutrões uma actividade gama para o fotópico seleccionado, muito superior, ao ^{197}Au e ao ^{115}In .

Verificou-se, também que após 15 minutos, o ^{51}V apresenta já uma actividade acumulada, praticamente máxima e uma elevada queda da actividade inicial, enquanto que quer o ^{197}Au quer o ^{115}In , apresentam ainda actividades significativas, sendo necessário, um período de aquisição bastante alargado, para se atingir o nível de contagens verificadas para o ^{51}V após 15 minutos.

Assim o ^{51}V , satisfaz o primeiro requisito proposto, para a viabilização da monitorização em intervalos sucessivos de neutrões com espectrometria de Bonner em modalidade passiva. No entanto para que a espectrometria de Bonner se possa aplicar a monitorizações sucessivas, terá de se mostrar, que para pontos de interesse terapêutico ou de radioprotecção é possível realizar irradiação simultânea do conjunto de esferas que constitui o espectrometro de Bonner.

Um dos pontos de maior interesse é o isocentro, e de forma geral a medida para este ponto é efectuada com irradiação sequencial do conjunto das esferas, a uma distancia de 50 cm do isocentro.

Assim, ao longo deste capítulo será efectuada a simulação de uma sala de radioterapia com o LINAC a produzir um feixe de fótons de 18 MeV, de forma a se verificar se para o isocentro, a activação do elemento usado como detector não se altera para a irradiação individual das diferentes esferas, ou para a irradiação simultânea do conjunto das esferas.

As figuras seguintes resultam das simulações efectuadas e representam cada uma das referidas situações:

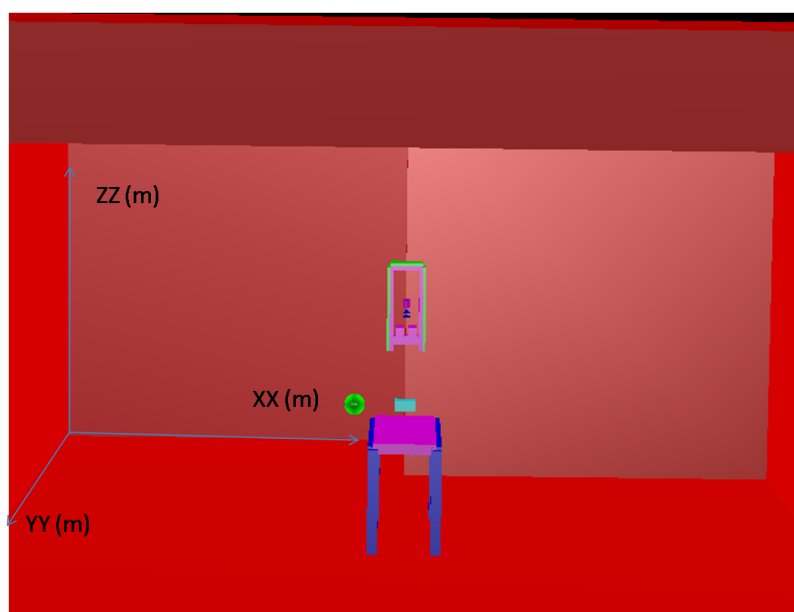


Figura 7.1: Esfera com 8" de diâmetro colocada a 50 cm do isocentro

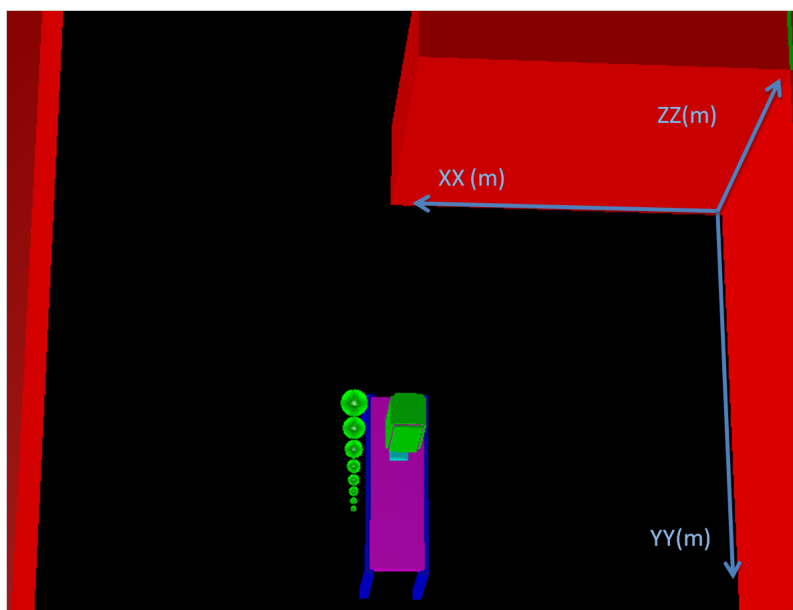


Figura 7.2: Conjunta das esferas colocadas na linha que dista 50 cm do isocentro

7.1 Simulação sala de radioterapia

Na figura seguinte representa-se o esquema com as dimensões da sala de radioterapia simulada e espessuras das paredes utilizadas, calculadas de forma a satisfazerem os requisitos de blindagem[30]

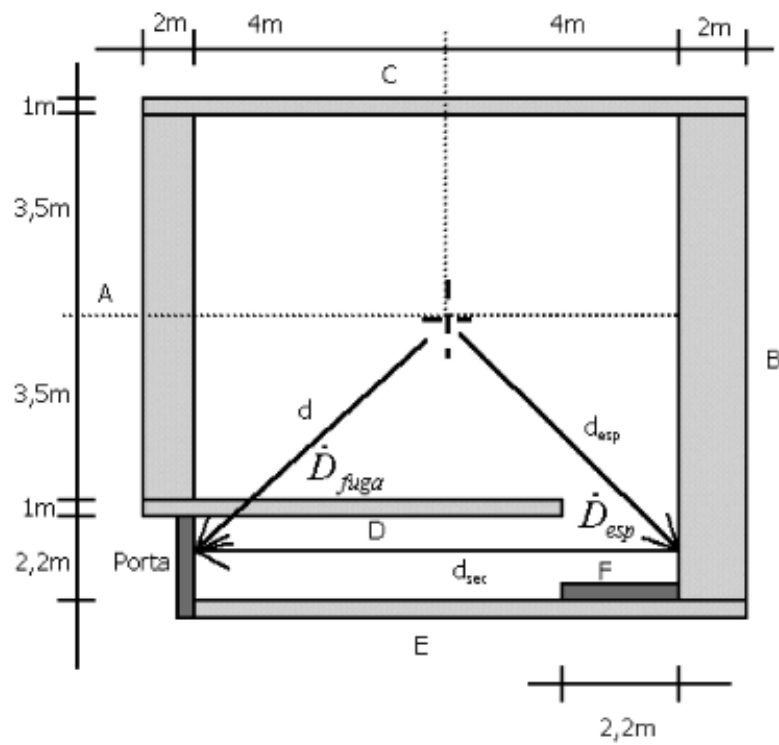


Figura 7.3: Dimensões da sala de radioterapia utilizada nas simulação

Os materiais utilizados nas paredes é o betão apresentando-se na tabela seguinte, a percentagem dos elementos constituintes[31]

Elemento	Betão (%)
Na	0.0171
Ca	0.0826
Fe	0.0122
Al	0.0456
Si	0.3203
O	0.5028
K	0.0194

Figura 7.4: Constituição química do betão utilizado na simulação

7.1.1 Componentes do LINAC utilizados para a simulação

Na definição dos materiais e geometrias que constituem, a "cabeça" do LINAC simulado, foi utilizada informação de múltiplos artigos, trabalhos efectuados em simulações deste género e especificações do fabricante para o modelo "Siemens Primus medical linear accelerator", o qual permite produção de feixe de fótons com energias desde 6 MeV a 18 MeV[32][33].

Foram utilizados na simulação das várias componentes da "cabeça" do LINAC, os seguintes volumes e materiais:

- Produção de fótons por Bremsstrahlung- utilizado, um gerador de electrões, com emissão aleatória sobre o alvo, definindo-se sobre esta estruturas um cilindro exterior com vácuo.
- Alvo - utilizado um cilindro com espessura de 3 mm, de tungsténio, delimitado por um cilindro exterior de cobre, utilizado nos sistemas reais para arrefecimento. Colocado na região inferior um cilindro de grafite utilizado, na absorção dos electrões que atravessam o alvo,

-
- Colimador primário- definida uma estrutura cônica de tungstênio,
 - Filtro aplanador- definida uma estrutura cônica de aço colocada posteriormente ao colimador primário.
 - Colimador secundário- utilizado na sua construção o tungstênio, e posicionados, de forma a se verificar a 100 cm da SSD (distância fonte superfície) um campo de fotões 10 x 10.
 - Fantoma- Definido um fantoma de água de 10X10X10 colocado a 100 cm do alvo. Utilizado na monitorização da dose absorvida, uma vez que os neutrões gerados, são normalizados à dose absorvida. Foi feito registo na superfície dos fotões incidentes de forma a se monitorizar o espectro de fotões gerado.

As figuras seguintes ilustram as várias componentes do LINAC, e o feixe colimado:

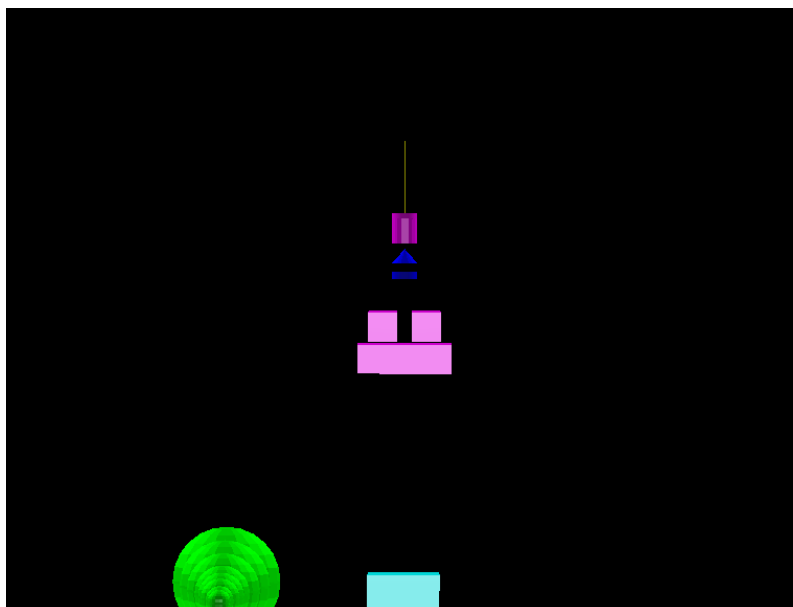


Figura 7.5: Simulação dos componentes do LINAC

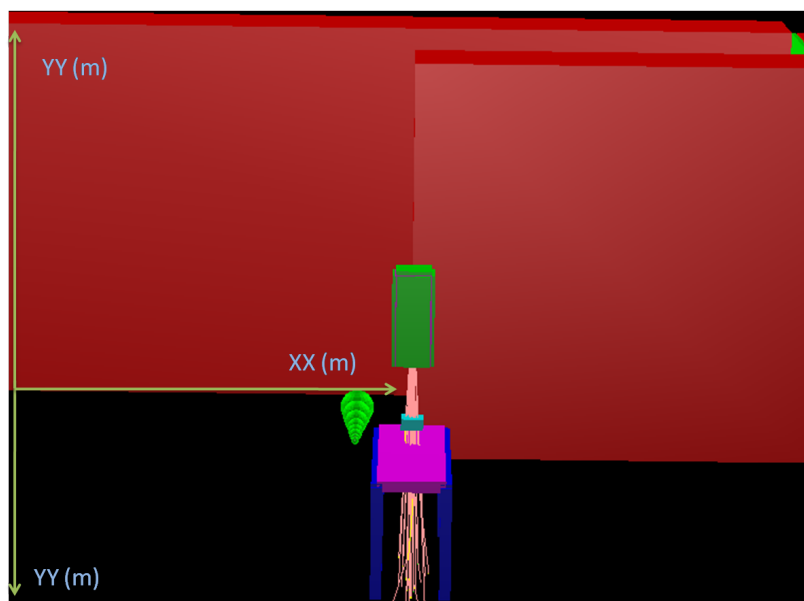


Figura 7.6: Visualização da colimação do feixe de fótons produzido pelo LINAC simulado

7.1.2 Definição das condições de simulação

Nas primeiras simulações não se definiram energias de corte para nenhuma das partículas, obtendo-se para a simulação de 1×10^6 eventos, de electrões com energia de 18 MeV apenas 40123 neutrões e uma dose de energia depositada de $1,7 \times 10^{-8}$ Gy. Como o objectivo da simulação, consistiu em averiguar a existência de diferenças na activação do elemento definido como detector, quando se faz irradiação individual ou simultânea, e considerando que estão descritas fluências de neutrões da ordem dos 10×10^{12} por Gray, foram utilizadas os seguintes aspectos, de forma a se aumentar a rapidez da simulação:

- definidas energias de corte para os fótons e electrões de 7,2 MeV, uma vez que a probabilidade, de fótons com energia inferiores a 7 MeV desencadearem reacções fotonucleares é muito reduzida (limiar desta reacção 7-8 Mev),
- de forma a se tornarem todos os eventos efectivos na possibilidade de se produzir fotonetrões, substitui-se o gerador de electrões por um gerador

de fótons, colocado anteriormente ao alvo, com emissão aleatória de fótons de 18 MeV para um ângulo de 45° ,

Com estas condições foram efectuadas simulações para a configuração, que apresenta o conjunto de esferas na disposição anteriormente apresentada, e para as configurações com colocação das esferas individualmente a 50 cm do isocentro.

7.2 Resultados obtidos e discussão

De forma a se evidenciar as estruturas e os materiais responsáveis pela geração do neutrões, definiu-se na análise (anexo 3) o "preenchimento" de um histograma 3D com as posições do neutrões gerados.

Na figura seguinte ilustra um desses histogramas, para simulação de 5×10^7 eventos:

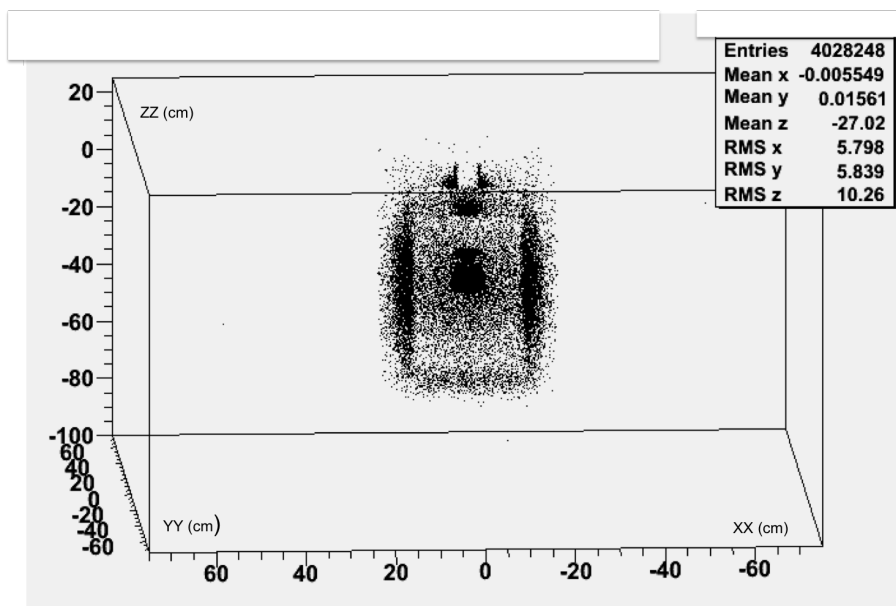


Figura 7.7: Histograma com as posições de produção dos neutrões

Da análise do histograma conclui-se que tal como descrito em bibliografia, as estruturas onde se verifica produção de neutrões são constituídas por elementos

de elevado número atómico. Neste caso, verifica-se que os colimadores, alvo filtro aplanador e as estruturas de blindagem, são as zonas onde se verifica maior produção de neutrões.

O seguinte histograma representa o espectro de energias dos neutrões gerados para a simulação de 50×10^6 eventos, com as condições anteriormente referidas:

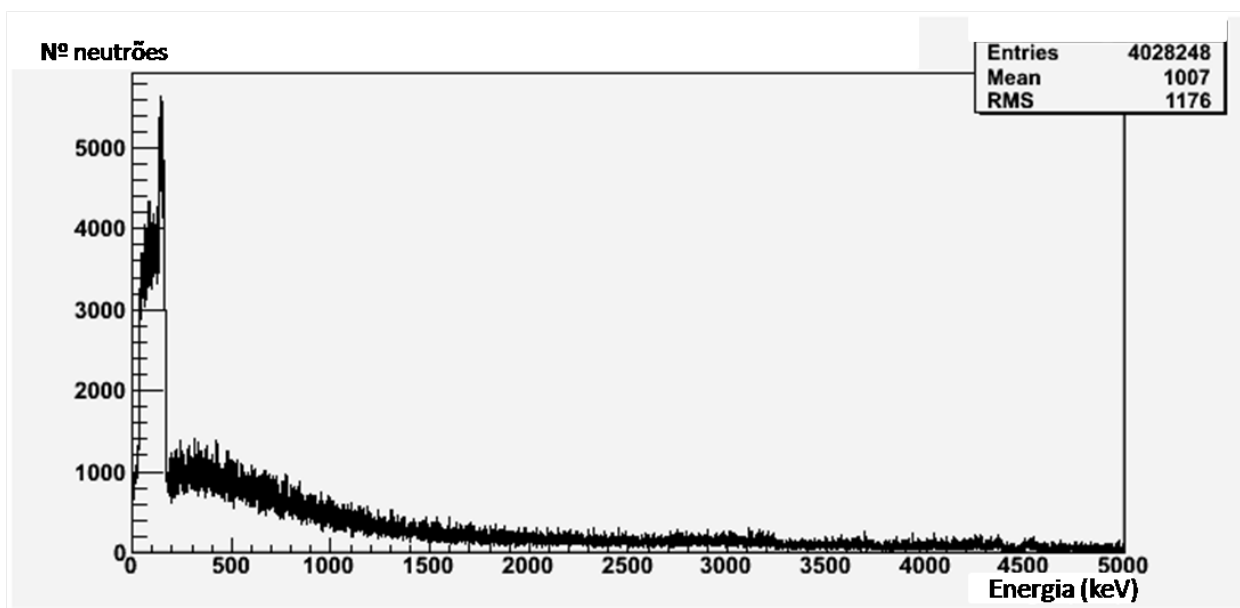


Figura 7.8: Espectro de energias dos neutrões gerados (keV)

Verificamos que tal como descrito a região dominante corresponde a um espectro de evaporação nuclear, com o pico centrado entre 150-200 keV, verificando-se na região dos MeV, uma fracção de neutrões muito mais reduzida resultado da extracção directa.

Na figura seguinte representa-se a distribuição espacial, dos neutrões gerados, para a simulação de 10000 partículas por evento (traços representativos apenas de neutrões)

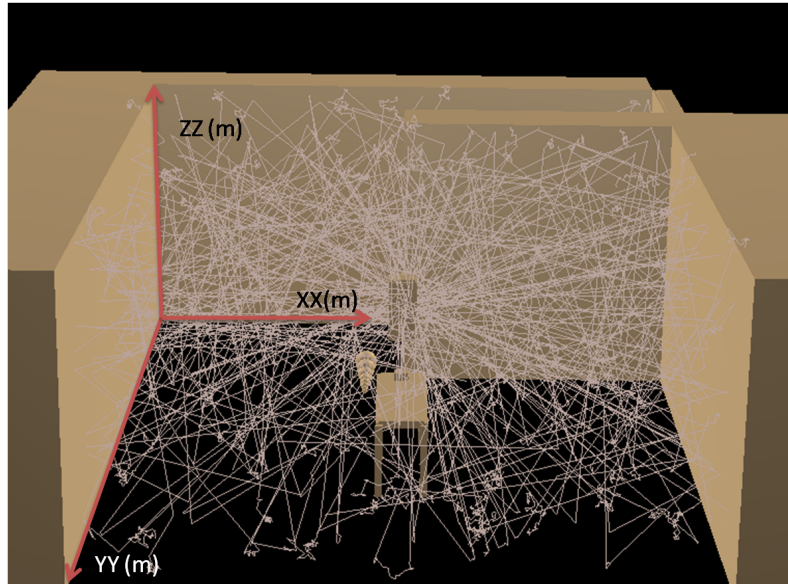


Figura 7.9: Distribuição espacial dos neutrões gerados

Sendo aparentemente para as dimensão das sala de radioterapia consideradas, e posicionamento do LINAC, (centro) isotrópica.

Considerando que para o número de eventos simulados, apenas se verificou uma produção de 4×10^6 neutrões, de forma a que com uma fluência tão reduzida se estimar a activação para as diferentes esferas e configurações, foi utilizada, um volume de amostra muito superior às estimativas do capítulo anterior, definindo-se uma folha com 6 mm de espessura e 6 cm de diâmetro. No entanto mesmo nestas condições não se verificou para qualquer esfera e posição registo de núcleos activados, o que de certa forma é previsível, considerando a função de resposta de cada uma das esferas, e considerando que efectivamente a activação é esperada para fluências próximas das descritas para estes espaços.

Neste contexto, tentou direccionar-se a análise para o registo dos neutrões sobre o material moderador, verificando-se de igual forma uma incidência muito reduzida, em média de 6-8 neutrões independentemente da posição (isocentro ou posição no conjunto) da esfera, não se retirando assim conclusões objectivas acerca da possibilidade de irradiação simultânea.

O histograma seguinte, represente as posições dos neutrões detectados para o

conjunto das esferas:

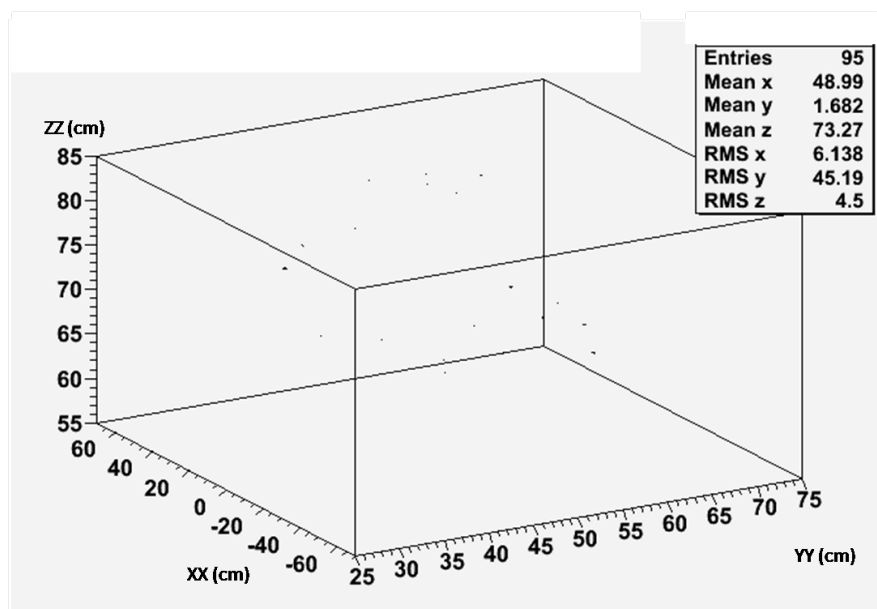


Figura 7.10: Posição dos neutrões detectados para a configuração com o conjunto das esferas

Verificando-se mesmo para esta situação apenas o registo de 95 neutrões.

Capítulo 8

Projectos futuros

Tendo em consideração, que as simulações relativas à possibilidade, de irradiação simultânea não foram esclarecedoras, haverá necessidade de se efectuar nova simulação com as seguintes considerações adicionais:

- reformular as geometrias e materiais utilizados, acrescentando algumas das componentes do LINAC ausentes nas simulações efectuadas,
- otimizar a energia de cortes, para os diferentes processos envolvidos de forma a conseguir-se uma simulação mais eficiente.
- normalizar os neutrões produzidos, a uma dose de 1 Gy, a 100 cm do SSD¹,

Posteriormente e em função dos resultados, das simulações, e considerando que o espectro típico é essencialmente um espectro de evaporação com o pico dos neutrões rápidos centrado em 200-700 keV, sendo a fracção dos neutrões de extracção directa, pouco efectiva para feixes de energia inferior a 18 MeV, e atendendo a que as funções de resposta para as esferas de 10" e de 12", têm máximos superiores a 1 MeV, será feita ponderação dos diâmetros óptimos para campos desta amplitude, no intuito de se reduzir o volume ocupado pelas esferas.

No caso das simulações e optimização de diâmetros serem favoráveis, serão efectuados os seguintes trabalhos:

- Cálculo e validação da função de resposta para as esferas definidas nos pontos anteriores,

¹Source Skin distance

-
- Ponderação do uso de detector e electrónica associada, de forma a se iniciar a aquisição imediatamente após a irradiação.

Capítulo 9

Conclusões

A radioterapia com feixe de fotões, é a modalidade mais utilizada na actualidade. Tendo em consideração, que para os materiais que geralmente se utilizam nas várias componentes do LINAC, se verifica um limiar de de 8-10 MeV para as fotoreacções nucleares (e,n) e (γ, n) , responsáveis pela produção de neutrões, sempre que se utilizam feixes de fotões de energia superior a 8 MeV, verifica-se contaminação neutrónica.

Por outro lado, e considerando a menor dose colateral fotónica, e aumento da precisão na definição do volume a tratar, as modalidades conformais, tem-se assumido com grande protagonismo na actualidade. No entanto a necessidade de aumento do feixe primário para uma mesma dose (maior colimação), faz com que se verifique também um aumento do número de neutrões produzidos. Este facto associado, a que os neutrões libertados, tem um espectro típico de evaporação nuclear com energias médias por volta dos 400 -700 keV, o que lhe confere um efeito biológico máximo, torna necessário a ponderação da dose secundária a que o paciente é sujeito durante as sessões de radioterapia.

Tendo em consideração que o problema da contaminação neutrónica, se encontra já relativamente bem documentado esta tese teve como objectivo principal, efectuar revisão da modalidade passiva da espectrometria de Bonner, tentando ajusta-la a monitorizações sucessivas, com a utilização de elementos alternativos ao ^{197}Au , sendo efectuado para isso, numa primeira fase :

- estimativas analítica da activação e processo de decaimento, para diferentes elementos de forma a se encontrar um elemento que relativamente ao ^{197}Au ,

permita determinar a actividade de saturação para um mesmo nível de incerteza experimental, num período de tempo muito menor, e que poucos minutos após a irradiação apresenta uma actividade residual, permitindo assim novas irradiação para intervalos de tempo curtos.

- conclui-se que entre os elementos analisados o ^{51}V é o elemento que melhor responde a esses requisitos.

Numa segunda fase, foi feita ponderação do volume e da geometria, concluindo-se que para os volumes descritos na bibliografia, e para um período alargado de utilização não se verificava, consumo significativo de átomos, não se degradando assim a função de reposta. Por outro lado e atendendo ao factor de autoprotecção, definiu-se como geometria que optimiza a função de resposta a folha.

Foi também feita simulação do transporte de um feixe com distribuição espectral representativa, do espectro típico dos LINAC's clínicos, definindo-se a fluência sobre as superfície da amostra, e estimando-se a partir da convolução da fluência com a secção eficaz, a actividade para os diferentes elementos, concluindo-se que o ^{51}V é o elemento com maior contagem acumulada para aquisição de 15 minutos imediatamente após a irradiação, e que é o elemento com maior actividade após a irradiação.

Após se estabelecer, através das considerações anteriores a viabilização da monitorização sucessiva com a utilização do ^{51}V , foi feita a simulação da produção de neutrões numa sala de radioterapia, de forma a se verificar se o mesmo nível de activação acontecia para as esferas irradiadas isoladamente no isocentro, ou de forma simultânea.

Tendo em consideração, que os campos de neutrões descritos apresentam fluências de 1×10^{12} no isocentro, e que com o número de eventos simulados apenas se produziram 4×10^6 neutrões, não foi possível inferir de forma conclusiva se efectivamente a irradiação conjunta não apresenta variações relativamente à sequencial.

Verificou-se contudo que a produção dos neutrões é de forma essencial efectuada nas estruturas constituídas por elementos de elevado numero atómico, e que o espectro de neutrões produzidos, corresponde de forma essencial a um espectro de evaporação nuclear.

Esferas de Bonner

Foi criado um único ficheiro, com todas as opções referentes a materiais, meios e geometrias utilizadas com as esferas de Bonner, transcrevendo-se de seguida o código desenvolvido para o efeito:

```
// seleccao do material utilizado no meio activo
//-----
// ouro:          ouro
// Vanadio:      vanadio
// indio:        indio

TString meio = "ouro";
//-----
// seleccao das distintas geometria necess[U+FFFD]rias a ponderaco da eficiencia ↔
da activacao e calculo da funcao de resposta
//-----
//esferica:          "esferica"
//cilindrica:        "cilindrica"
//sem moderador_esfe "smoderesfer"
//sem moderador_cili "smodercili"

TString geometria = "cilindrica";
//-----
//dimensoes meio activo
//-----
//geometria esferica
```

```

Double_t raio_int_esf =0;
Double_t raio_ext_esf =3;
//geometria cilindrica
Double_t raio_int_cil=0;
Double_t raio_ext_cil=0.5;
Double_t espessura=0.005;
//geometria s_moder_esfer
Double_t raio_int_esf_sm=0;
Double_t raio_ext_esf_sm=0.09085;
//geometria s_moder_cili
Double_t raio_int_cil_sm=0;
Double_t raio_ext_cil_sm=0.5;
Double_t espessura_sm=0.005;

//-----
//diametros material moderador
//-----
//inc    cm
//2,5    6.35
//3      7.62
//3,5    8.89
//4      10.16
//4,5    11.43
//5      12.7
//5,5    13.97
//6      15.24
//7      17.78
//8      20.32

Double_t diametro = 12.7/2;

//-----
// nome do TGeoVolumeAssembly("BonnerSphere_xcm_mat")
//-----
//BonnerSphere_6.35cm_element_geometria
//BonnerSphere_7.62cm_elemento
//BonnerSphere_8.89cm

```

```

//BonnerSphere_10.16cm
//BonnerSphere_11.43cm
//BonnerSphere_12.7cm
//BonnerSphere_13.97cm
//BonnerSphere_15.24cm
//BonnerSphere_17.78cm
//BonnerSphere_20.32cm

TString nomeassembliesf ="BonnerSphere_12.7cm_ouro_esferica_0.75cm";
TString nomeassemblycili= "BonnerSphere_12.7cm_ouro_cilindrica";
TString nomeassembliesf_sm= "BonnerSphere_12.7cm_ouro_esferica_sm";
TString nomeassemblycili_sm="BonnerSphere_12.7cm_ouro_cilindrica_sm";

// — Elementos utilizados
TGeoElement* elH = new TGeoElement("Hydrogen", "H", z= 1, a= 1.00794);
TGeoElement* elC = new TGeoElement("Carbon", "C", z= 6, a= 12.0107);
TGeoElement* elV = new TGeoElement("Vanadio", "V", z=23, a=50.94);
TGeoElement* elMn = new TGeoElement("Manganesio", "Mn", z=25, a=54.93);
TGeoElement* elAu = new TGeoElement ("197Au", "Au", z=79, a=196.96);
TGeoElement* elIn = new TGeoElement ("115In", "In", z=49, a =114.8);
TGeoElement* elCd = new TGeoElement ("cadmio", "Cd", z=48, a=112.4);

// — Definicao dos Materiais

//polietileno
nel      =2;
density =0.93;
TGeoMixture* pMatPolyethylene =new TGeoMixture("Polyethylene", nel, density);
w = 0.666666; //66 C
pMatPolyethylene->AddElement(elC,w);
w = 0.333333; // 33 H
pMatPolyethylene->AddElement(elH,w);
pMatPolyethylene->SetIndex(1);
TGeoMaterial *pMatVacuo = new TGeoMaterial("Vacuum", 0,0,0);
pMatVacuo->SetIndex(4);

```

```

//197 Au
    nel      =1;
    density  =19.3;
    TGeoMixture*pMatAu =new TGeoMixture("Au",nel, density);
    w=1.00000;
    pMatAu->AddElement(elAu, w);
    pMatAu->SetIndex(4);
//51V
    nel=1;
    density=6.11;
    TGeoMixture*pMatV = new TGeoMixture("V",nel,density);
    w=1.0000;
    pMatV->AddElement(elV,w);
    pMatV->SetIndex(6);
//115 In
    nel=1;
    density=7.29;
    TGeoMixture*pMatIn = new TGeoMixture("In",nel,density);
    w=1.0000;
    pMatIn->AddElement(elIn,w);
    pMatIn->SetIndex(7);

// meios

    numed    =21;
    pMedPolyethylene = new TGeoMedium("Air", numed,pMatAir, par);
    pMedPolyethylene = new TGeoMedium ("Polyethylene", numed, pMatPolyethylene);
    numed    = 22;
    pMedAir = new TGeoMedium("Air", numed,pMatAir, par);
    pMedAir = new TGeoMedium("Air", numed, pMatAir);
    numed    = 23;

    pMedVacuo = new TGeoMedium("Vacuum", numed, pMatVacuo);
    numed    = 24;

    pMedAu= new TGeoMedium("Au",numed, pMatAu);
    numed    = 25;

```

```

pMedMn= new TGeoMedium ("Mn", numed, pMatMn);
numed =26;

pMedV = new TGeoMedium ("V", numed, pMatV);
numed= 27;
pMedIn=new TGeoMedium ("In", numed, pMatIn);
numed=28;

//variaveis esferica

Double_t srminin=raio_int_esf;
Double_t srmaxint=raio_ext_esf;
Double_t srminext=raio_ext_esf;
Double_t srmaxext=diametro;
Double_t srminvacuo=diametro;
Double_t srmaxvacuo=1100.0;

Double_t stheta1=0;  [U+FFFD]
Double_t stheta2=180;
Double_t sph1=0;
Double_t sph2=360;

//variaveis cilindricas

    Double_t rminci= raio_int_cil;
    Double_t rmaxci=raio_ext_cil;
    Double_t ez=espessura;

    Double_t exrminci=raio_ext_cil;
    Double_t exrmaxci=diametro;

    Double_t rminext=0;
    Double_t rmaxext=diametro;

```

```

Double_t rminvacuo=diametro;
Double_t rmaxvacuo=1100.0;

Double_t theta1=0; //
Double_t theta2=180;
Double_t phi1=0;
Double_t phi2=360;

//variaveis s_moder_esfer
Double_t smrminin=raio_int_esf_sm;
Double_t smrmaxint=raio_ext_esf_sm;
//Double_t smrminext=raio_ext_esf_sm;
// Double_t smrmaxext=diametro;
Double_t smrminvacuo=raio_ext_esf_sm;
Double_t smrmaxvacuo=1100.0;

Double_t smtheta1=0; //
Double_t smtheta2=180;
Double_t smphi1=0;
Double_t smphi2=360;

//Variaveis s_moder_cili
Double_t smrminci= raio_int_cil_sm;
Double_t smrmaxci=raio_ext_cil_sm;
Double_t smez=espessura_sm;

Double_t smexrminci=raio_ext_cil_sm;
Double_t smexrmaxci=diametro;

Double_t smcrminext=0;
Double_t smcrmaxext=diametro;

Double_t smcrminvacuo=diametro;
Double_t smcrmaxvacuo=1100.0;

Double_t smctheta1=0; //
Double_t smctheta2=180;

```

```

    Double_t smcphi1=0;
    Double_t smcphi2=360;

configuracao esferica
TGeoShape* exterior = new TGeoSphere(srminext, srmaxext, stheta1, stheta2, ←
    sphi1, sphi2);
TGeoShape* interior = new TGeoSphere(srminin, srmaxint, stheta1, stheta2, ←
    sphi1, sphi2);
TGeoShape* vacuo = new TGeoSphere(srminvacuo, srmaxvacuo, stheta1, stheta2, ←
    sphi1, sphi2);

configuracao cilindrica
TGeoShape* esexteriorf = new TGeoSphere(rminext, rmaxext, theta1,90, phi1, ←
    phi2);
TGeoShape* esexterioro = new TGeoSphere(rminext, rmaxext, 90,180, phi1, ←
    phi2);
TGeoShape* ciinterior = new TGeoTube(rminci, rmaxci, ez);
TGeoShape* ciexterior = new TGeoTube(exrminci, exrmaxci, ez);
TGeoShape* cvacuo = new TGeoSphere(rminvacuo, rmaxvacuo, theta1, theta2, ←
    phi1, phi2);

configuracao s_moder_esfer
//TGeoShape* smexterior = new TGeoSphere(smrminext, smrmaxext, smtheta1, ←
    smtheta2, smphi1, smphi2);
TGeoShape* sminterior = new TGeoSphere(smrminin, smrmaxint, smtheta1, ←
    smtheta2, smphi1, smphi2);
TGeoShape* smvacuo = new TGeoSphere(smrminvacuo, smrmaxvacuo, smtheta1, ←
    smtheta2, smphi1, smphi2);

configuracao s_moder_cili
TGeoShape* smesexteriorf = new TGeoSphere(smcrminext, smcrmaxext, ←
    smcttheta1,90, smcphi1, smcphi2);
TGeoShape* smesexterioro = new TGeoSphere(smcrminext, smcrmaxext, 90,180, ←
    smcphi1, smcphi2);
TGeoShape* smciinterior = new TGeoTube(smcrminci, smcrmaxci, smez);
TGeoShape* smciexterior = new TGeoTube(smexrminci, smexrmaxci, smez);
TGeoShape* smcvacuo = new TGeoSphere(smcrminvacuo, smcrmaxvacuo, ←

```

```

        smctheta1, smctheta2, smcphi1, smcphi2);

//volumes configuracao esferica
TGeoVolume* sexterior = new TGeoVolume ("sphereexterior", exterior, ↔
    pMedPolyethylene);
TGeoVolume* svacuuo = new TGeoVolume ("svacuuum",vacuo,pMedVacuo);
TGeoVolume* sinteriorau =new TGeoVolume("interiorAu", interior,pMedAu);
AddSensitiveVolume(sinteriorau);
TGeoVolume* sinteriorv =new TGeoVolume("interiorv", interior,pMedV);
AddSensitiveVolume(sinteriorv);
TGeoVolume* sinteriormn =new TGeoVolume("interiormn", interior,pMedMn);
AddSensitiveVolume(sinteriormn);
TGeoVolume* sinteriorin =new TGeoVolume("interiorin", interior,pMedIn);
AddSensitiveVolume(sinteriorin);

//volumes configuracao cilindrica
TGeoVolume* scvacuo = new TGeoVolume ("scvacuum",cvacuuo,pMedVacuo);
TGeoVolume* sexteriorf = new TGeoVolume ("sphererefrente", esexteriorf, ↔
    pMedPolyethylene);
TGeoVolume* sexteriorort = new TGeoVolume ("spheretras", esexteriorort, ↔
    pMedPolyethylene);
TGeoVolume* scexterior = new TGeoVolume ("cilindroexterior", ciexterior,↔
    pMedPolyethylene );
TGeoVolume* scinteriorau = new TGeoVolume ("cilindrointerau", ciinterior,↔
    pMedAu);
AddSensitiveVolume(scinteriorau);
TGeoVolume* scinteriorv = new TGeoVolume ("cilindrointerv", ciinterior, ↔
    pMedV);
AddSensitiveVolume(scinteriorv);
TGeoVolume* scinteriormn = new TGeoVolume ("cilindrointermn", ciinterior,↔
    pMedMn);
AddSensitiveVolume(scinteriormn);
TGeoVolume* scinteriorin = new TGeoVolume ("cilindrointerid", ciinterior,↔
    pMedIn);
AddSensitiveVolume(scinteriorin);

```

```

//volumes configuracao s_moder_esfer
//TGeoVolume* sm_exterior = new TGeoVolume ("smphereexterior", smexterior, ←
    pMedVacuo);
TGeoVolume* sm_svacuo = new TGeoVolume ("smvacuum", smvacuo, pMedVacuo);
TGeoVolume* sm_interiorau = new TGeoVolume("sminteriorAu", sminterior, ←
    pMedAu);
AddSensitiveVolume(sm_interiorau);
TGeoVolume* sm_interiorv = new TGeoVolume("sminteriorv", sminterior, pMedV) ←
    ;
AddSensitiveVolume(sm_interiorv);
TGeoVolume* sm_interiormn = new TGeoVolume("sminteriormn", sminterior, ←
    pMedMn);
AddSensitiveVolume(sm_interiormn);
TGeoVolume* sm_interiorin = new TGeoVolume("sminteriorin", sminterior, ←
    pMedIn);
AddSensitiveVolume(sm_interiorin);

//volumes configuracao s_moder_cili
TGeoVolume* smscvacuo = new TGeoVolume ("smsvacuum", smscvacuo, pMedVacuo);
TGeoVolume* smsexteriorf = new TGeoVolume ("smspherefrente", ←
    smsexteriorf, pMedVacuo);
TGeoVolume* smsexteriorort = new TGeoVolume ("smspheretras", smsexteriorort, ←
    pMedVacuo);
TGeoVolume* smscexterior = new TGeoVolume ("smcilindroexterior", ←
    smciexterior, pMedVacuo);
TGeoVolume* smscinteriorau = new TGeoVolume ("smcilindrointerau", ←
    smciinterior, pMedAu);
AddSensitiveVolume(smscinteriorau);
TGeoVolume* smscinteriorv = new TGeoVolume ("smcilindrointerv", ←
    smciinterior, pMedV);
AddSensitiveVolume(smscinteriorv);
TGeoVolume* smscinteriormn = new TGeoVolume ("smcilindrointermn", ←
    smciinterior, pMedMn);
AddSensitiveVolume(smscinteriormn);
TGeoVolume* smscinteriorin = new TGeoVolume ("smcilindrointerid", ←
    smciinterior, pMedIn);
AddSensitiveVolume(smscinteriorin);

```

```

TGeoRotation *rot = new TGeoRotation("rot",0,0,0);
    Double_t tx = 0.0;
    Double_t ty = 0.0;
    Double_t tz = 0.0;

//assembly esferica
    TGeoVolume*Sphere_esferica = new TGeoVolumeAssembly(nomeassembliesf);
    Sphere_esferica->AddNode(sexterior, 11, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ←
        rot));
    Sphere_esferica->AddNode(svacu, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot←
        ));
    if (meio=="ouro")
    Sphere_esferica->AddNode(sinteriorau, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz←
        , rot));
    else
        if (meio=="manganesio")
    Sphere_esferica->AddNode(sinteriormn, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty←
        , tz, rot));
    else
        if (meio=="vanadio")
    Sphere_esferica->AddNode(sinteriorv, 13, new TGeoCombiTrans(tx,←
        ty, tz, rot));
    else
        if (meio=="indio")
    Sphere_esferica->AddNode(sinteriorin, 13, new ←
        TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

//assembly cilindrica
    TGeoVolume*Sphere_cil = new TGeoVolumeAssembly(nomeassemblycili);
    tz=espessura;
    Sphere_cil->AddNode(sexteriorf, 11, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ←
        rot));
    tz=0;
    if (meio=="ouro")

```

```

Sphere_cil->AddNode(scinteriorau, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz↵
, rot));
else
    if(meio=="vanadio")
        Sphere_cil->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx,↵
ty, tz, rot));
    else
        if (meio=="manganesio")
            Sphere_cil->AddNode(scinteriormn, 12, new ↵
TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        else
            if (meio=="indio")
                Sphere_cil->AddNode(scinteriorin, 12, new ↵
TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=0;
Sphere_cil->AddNode(sce exterior, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, ↵
tz, rot));
tz=espessura;
Sphere_cil->AddNode(sexteriort, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, ↵
tz, rot));
tz=0;
Sphere_cil->AddNode(svacuο, 15, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ↵
rot));

//assembly s_moder_esfer
TGeoVolume*Sphere_esferica_sm = new TGeoVolumeAssembly(↵
nomeassembliesf_sm);
//Sphere_esferica_sm->AddNode(sm_exterior, 11, new ↵
TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
Sphere_esferica_sm->AddNode(sm_svacuo, 12, new ↵
TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
if (meio=="ouro")
Sphere_esferica_sm->AddNode(sm_interiorau, 13, new ↵
TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
else
    if (meio=="manganesio")

```

```

Sphere_esferica_sm->AddNode(sm_interiormn, 13, new ←
    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
else
    if (meio=="vanadio")
        Sphere_esferica_sm->AddNode(sm_interiorv, 13, new ←
            TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    else
        if (meio=="indio")
            Sphere_esferica_sm->AddNode(sm_interiorin, 13, ←
                new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

//assembly s_moder_cili

TGeoVolume*Sphere_cil_sm = new TGeoVolumeAssembly(←
    nomeassemblycili_sm);
tz=espessura_sm;
Sphere_cil_sm->AddNode(smsexteriorf, 11, new ←
    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=0;
if (meio=="ouro")
    Sphere_cil_sm->AddNode(smscinteriorau, 12, new ←
        TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
else
    if (meio=="vanadio")
        Sphere_cil_sm->AddNode(smscinteriorv, 12, new ←
            TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    else
        if (meio=="manganesio")
            Sphere_cil_sm->AddNode(smscinteriormn, 12, ←
                new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        else
            if (meio=="indio")
                Sphere_cil_sm->AddNode(smscinteriorin, 12, ←
                    new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=0;
Sphere_cil_sm->AddNode(smsexterior, 13, new ←

```

```

        TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    tz=--espesura_sm;
    Sphere_cil_sm->AddNode(smsexteriort, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    tz=0;
    Sphere_cil_sm->AddNode(smscvacuo, 15, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx = 0.0;
ty = 0.0;
tz = 0.0;

if (geometria=="esferica")
{
    vWorld->AddNode(Sphere_esferica, 1000, new TGeoCombiTrans(tx,ty,tz,rot) );
    // index: cp2-
}
else
    if (geometria=="cilindrica")
    {
        vWorld->AddNode(Sphere_cil, 1001, new TGeoCombiTrans(tx,ty,tz,rot) );
        // index: cp2-
    }
    else
        if (geometria=="smoderesfer")
        {
            vWorld->AddNode(Sphere_esferica_sm, 1002, new TGeoCombiTrans(tx,
            ty,tz,rot) ); // index: cp2-
        }
        else
            if (geometria=="smodercili")
            {
                vWorld->AddNode(Sphere_cil_sm, 1003, new TGeoCombiTrans(tx,
                ty,tz,rot) ); // index: cp2-
            }
        }
    }
}

```

Métodos de activação

Na análise da geometria que optimiza a função de resposta, e considerando os seguintes aspectos :

- Foi utilizado um feixe de neutrões térmicos a incidir uniformemente sobre as geometrias definidas, estando o gerador e o volume do elemento utilizado, introduzidos numa esfera de vácuo,
- a eficiência de activação foi comparada, utilizando-se o mesmo elemento para diferentes geometrias,

Utilizou-se para ponderação da activação, o registo dos "prompt gama" produzidos uma vez que para estas condições o único processo de produção de fotões é a captura. Por outro lado e atendendo a que a activação foi comparada, para o mesmo elemento, não houve necessidade, de ponderar o rendimento de produção de "prompt gamma" por captura.

Na análise da actividade verificada para cada um dos elementos, para as distintas esferas quando expostas ao espectro típico dos LINAC, e considerando que se pretendia determinar quantidades, como actividade de saturação, actividade após a irradiação e para vários períodos após a irradiação, utilizou-se o seguinte metodo:

- feita a simulação do transporte dos neutrões no material moderador, definindo-se as fluência sobre a superfície do detector,
- determinada a actividade de saturação, a partir da convolução das fluências para as várias energias do neutrões que atravessam o detector, com a respectiva secção eficaz,

-
- , calculadas a partir da actividade de saturação, a actividade após o tempo de irradiação, e para os primeiros 15 minutos após a irradiação.

O "binning" dos histogramas referentes às energias do neutrões que atravessaram o detector, foram definidos de forma a serem menores que os intervalos das secções eficazes [14], aplicando-se o seguinte código para o cálculo das quantidades mencionadas:

```
//-----selecionar elemento-----
//-----"ouro"-----
//-----"indio"-----
//-----"vanadio"-----

elemento="ouro";

// ficheiros com as seccoes eficazes para os diferentes elementos

// ifstream xsecfile("Au197.C",ios::in);

// ifstream xsecfile("In115.c",ios::in);

// ifstream xsecfile("V51.C",ios::in);

// Extraccao dos valores da seccao eficaz para um vector, considerando-se ←
apenas os valores de indice impar

while(!xsecfile.eof())
{
    xsecfile.getline(buffer,sizeof(buffer));
    sscanf(buffer,"%e %e %e %e %e %e",&e_value[ii],&xsec_value[ii],&←
    e_value[ii+1],&xsec_value[ii+1],&e_value[ii+2],&xsec_value[←
    ii+2]);
}
```

```

//          printf("%f %f %f %f %f %f\n",e_value[ii], xsec_value[ii], e_value[←
ii+1], xsec_value[ii+1], e_value[ii+2], xsec_value[ii+2]);

        ii = ii + 3;

    }

    xsecfile.close();

//selecco do ficheiro com os histogramas referentes as fluencias de forma a se ←
proceder a respectiva convolucao

// neutron_file = new TFile("sphere5_Au_esp_E6_G3.root");
// neutron_file = new TFile("spher32_12_In_1000E3.root");
// neutron_file = new TFile("sphere2_12_V_1000E3.root");
    printf("exterior orientada para a fonte\n");
//
//termicos
//

    sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_exterio_ev");
    hist_ext = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

    for(int jj=3; jj<=385; jj=jj+2)
    {
        number_of_counts_ext = 0;

        hist_ext->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
        number_of_counts_ext = hist_ext->Integral();
        printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

        act_ext = act_ext + number_of_counts_ext * xsec_value[jj-2];

        printf("number of counts %d\n", number_of_counts_ext);

```

```

        printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], act_ext←
            );
        printf("\n");

    }

//
// epitermicos
//

    sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_exterio_Kev");
    hist_ext = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

    for(int jj=387; jj<=655; jj=jj+2)
    {
        number_of_counts_ext = 0;

        hist_ext->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
        number_of_counts_ext = hist_ext->Integral();
        printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

        act_ext = act_ext + number_of_counts_ext * xsec_value[jj-2];

        printf("number of counts %d\n", number_of_counts_ext);
        printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], act_ext←
            );
        printf("\n");

    }

//
// neutroes rapidos
//

    sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_exterio_Mev");
    hist_ext = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

```

```

for(int jj=657; jj<=921; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_ext = 0;

    hist_ext->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
    number_of_counts_ext = hist_ext->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

    act_ext = act_ext + number_of_counts_ext * xsec_value[jj-2];

    printf("number of counts %d\n", number_of_counts_ext);
    printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], act_ext↵
        );
    printf("\n");
}

printf("exterior oposta a fonte\n");
// neutroess termicos superficie oposta
sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_exterio_ev_op");
hist_ext_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=3; jj<=385; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_ext_op = 0;

    hist_ext_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
    number_of_counts_ext_op = hist_ext_op->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

    act_ext_op = act_ext_op + number_of_counts_ext_op * xsec_value[jj↵
        -2];

    printf("number of counts %d\n", number_of_counts_ext_op);
    printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], ↵
        act_ext_op);
    printf("\n");
}

```

```

    }

    //
    //epitermicos superficie oposta
    //

    sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_exterio_Kev_op");
    hist_ext_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

    for(int jj=387; jj<=655; jj=jj+2)
    {
        number_of_counts_ext_op = 0;

        hist_ext_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2], e_value[jj]);
        number_of_counts_ext_op = hist_ext_op->Integral();
        printf("energies from %f to %f \n", e_value[jj-2], e_value[jj]);

        act_ext_op = act_ext_op + number_of_counts_ext_op * xsec_value[jj-2];

        printf("number of counts %d\n", number_of_counts_ext_op);
        printf("cross section value %f, act_ext %f\n", xsec_value[jj-2], act_ext_op);
        printf("\n");
    }

    // neutroes rapidos

    sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_exterio_Mev_op");
    hist_ext_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

    for(int jj=657; jj<=921; jj=jj+2)
    {

```

```

        number_of_counts_ext_op = 0;

        hist_ext_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
        number_of_counts_ext_op = hist_ext_op->Integral();
        printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

        act_ext_op = act_ext_op + number_of_counts_ext_op * xsec_value[jj-2];

        printf("number of counts %d\n", number_of_counts_ext_op);
        printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], ←
                act_ext_op);
        printf("\n");
    }
printf("meio orientada para a fonte\n");

    sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_meio_ev");
    hist_meio = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

    for(int jj=3; jj<=385; jj=jj+2)
    {
        number_of_counts_meio = 0;

        hist_meio->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
        number_of_counts_meio = hist_meio->Integral();
        printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

        act_meio = act_meio + number_of_counts_meio * xsec_value[jj-2];

        printf("number of counts %d\n", number_of_counts_meio);
        printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], ←
                act_meio);
        printf("\n");
    }

```

```

sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_meio_keV");
hist_meio = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=387; jj<=655; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_meio = 0;

    hist_meio->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
    number_of_counts_meio = hist_meio->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

    act_meio = act_meio + number_of_counts_meio * xsec_value[jj-2];

    printf("number of counts %d\n", number_of_counts_meio);
    printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], ←
        act_meio);
    printf("\n");
}

sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_meio_Mev");
hist_meio = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=657; jj<=921; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_meio = 0;

    hist_meio->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
    number_of_counts_meio = hist_meio->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);
}

```

```

        act_meio = act_meio + number_of_counts_meio * xsec_value[jj-2];

        printf("number of counts %d\n", number_of_counts_meio);
        printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], ←
                act_meio);
        printf("\n");

    }
printf("meio orientada oposta a fonte\n");
sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutros_meio_ev_op");
hist_meio_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=3; jj<=385; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_meio_op = 0;

    hist_meio_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
    number_of_counts_meio_op = hist_meio_op->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

    act_meio_op = act_meio_op + number_of_counts_meio_op * xsec_value[jj←
        -2];

    printf("number of counts %d\n", number_of_counts_meio_op);
    printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], ←
            act_meio_op);
    printf("\n");

}

sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutros_meio_Kev_op");
hist_meio_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=387; jj<=655; jj=jj+2)
{

```

```

number_of_counts_meio_op = 0;

hist_meio_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
number_of_counts_meio_op = hist_meio_op->Integral();
printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

act_meio_op = act_meio_op + number_of_counts_meio_op * xsec_value[jj-2];

printf("number of counts %d\n", number_of_counts_meio_op);
printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], act_meio_op);
printf("\n");
}

sprintf(hist_ext_name,"senergia_neutroes_meio_Mev_op");
hist_meio_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=657; jj<=921; jj=jj+2)
{
number_of_counts_meio_op = 0;

hist_meio_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj]);
number_of_counts_meio_op = hist_meio_op->Integral();
printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj]);

act_meio_op = act_meio_op + number_of_counts_meio_op * xsec_value[jj-2];

printf("number of counts %d\n", number_of_counts_meio_op);
printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], act_meio_op);
}

```

```

    printf("\n");
}

printf("interior orientada para a fonte\n");

sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_interior_ev");
hist_int = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=3; jj<=385; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_int = 0;

    hist_int->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2], e_value[jj]);
    number_of_counts_int = hist_int->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n", e_value[jj-2], e_value[jj]);

    act_int = act_int + number_of_counts_int * xsec_value[jj-2];

    printf("number of counts %d\n", number_of_counts_int);
    printf("cross section value %f, act_ext %f\n", xsec_value[jj-2], ←
        act_int);
    printf("\n");

}

//

//

sprintf(hist_ext_name, "senergia_neutroes_interior_Kev");
hist_int = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=387; jj<=655; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_int = 0;

```

```

hist_int->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj-1]);
    );
number_of_counts_int = hist_int->Integral();
printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj-1]);
    );

act_int = act_int + number_of_counts_int * xsec_value[jj-2];

printf("number of counts %d\n", number_of_counts_int);
printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj-2], act_int);
printf("\n");
}

sprintf(hist_ext_name,"senergia_neutroes_interior_Mev");
hist_int = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=657; jj<=921; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_int = 0;

    hist_int->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],e_value[jj-1]);
        );
number_of_counts_int = hist_int->Integral();
printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],e_value[jj-1]);
        );

act_int = act_int + number_of_counts_int * xsec_value[jj-2];

printf("number of counts %d\n", number_of_counts_int);

```

```

printf("cross section value %f, act_ext %f\n",xsec_value[jj←
-2], act_int);
printf("\n");

}
printf("interior oposta a fonte\n");

sprintf(hist_ext_name,"senergia_neutroes_interior_ev_op");
hist_int_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=3; jj<=385; jj=jj+2)
{
number_of_counts_int_op = 0;

hist_int_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],←
e_value[jj]);
number_of_counts_int_op = hist_int_op->Integral();
printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],←
e_value[jj]);

act_int_op = act_int_op + number_of_counts_int_op * ←
xsec_value[jj-2];

printf("number of counts %d\n", number_of_counts_int_op←
);
printf("cross section value %f, act_ext %f\n",←
xsec_value[jj-2], act_int_op);
printf("\n");

}

//

//

sprintf(hist_ext_name,"senergia_neutroes_interior_Kev_op");
hist_int_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

```

```

for(int jj=387; jj<=655; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_int_op = 0;

    hist_int_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],↵
        e_value[jj]);
    number_of_counts_int_op = hist_int_op->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],↵
        e_value[jj]);

    act_int_op = act_int_op + number_of_counts_int_op * ↵
        xsec_value[jj-2];

    printf("number of counts %d\n", number_of_counts_int_op↵
        );
    printf("cross section value %f, act_ext %f\n",↵
        xsec_value[jj-2], act_int_op);
    printf("\n");
}

//

sprintf(hist_ext_name,"senergia_neutroes_interior_Mev_op");
hist_int_op = (TH1F*)gDirectory->Get(hist_ext_name);

for(int jj=657; jj<=921; jj=jj+2)
{
    number_of_counts_int_op = 0;

    hist_int_op->GetXaxis()->SetRangeUser(e_value[jj-2],↵
        e_value[jj]);
    number_of_counts_int_op = hist_int_op->Integral();
    printf("energies from %f to %f \n",e_value[jj-2],↵
        e_value[jj]);
}

```

```

act_int_op = act_int_op + number_of_counts_int_op * ←
    xsec_value[jj-2];

printf("number of counts %d\n", number_of_counts_int_op←
);
printf("cross section value %f, act_ext %f\n",←
    xsec_value[jj-2], act_int_op);
printf("\n");
}

if (elemento=="ouro")
{

act_sat=(act_ext+act_ext_op)*1E-24*1.2E22+(act_meio+←
    act_meio_op)*1E-24*7E21+(act_int+act_int_op)*1E←
    -24*2.3E21;
act_4m_irr =act_sat*(1-exp(-0.000179*4));
natmos=act_4m_irr/(0.000179/60);
natmos_sat=act_sat/(0.000179/60);

printf("197Au\n");
printf("atividade de  $^{197}\text{Au}$  %f\n", act_sat);
printf("\n");
printf("atividade 4 minutos  $^{197}\text{Au}$  %f\n", ←
    act_4m_irr);
printf("\n");
printf("[U+FFFD]tmos 4 min  $^{197}\text{Au}$   $^{197}\text{Au}$  %f e para←
    a atividade de  $^{197}\text{Au}$  %f\n", natmos, ←
    natmos_sat);
printf("\n");

for (int i; i<=15; i++)
{
act_m=act_4m_irr*exp(-0.000179*i);
act_ac15m_v[i]=act_m ;
}
}

```

```

printf("atividade de 0 a 15 min")
printf(" %f\n", act_m);

}

for (int i=1; i<=15; i++)
{
    cont_ac =act_ac15m_v[i-1]*60 + cont_ac;
    printf("contagens acumuladas de 1 a 15 min")
    printf("%f\n", cont_ac);

}

}
else
    if (elemento=="indio")
    {

act_sat=(act_ext+act_ext_op)*1E-24*7.5E21+(act_meio+↵
    act_meio_op)*1E-24*4.5E21+(act_int+act_int_op)*1E↵
    -24*1.5E21;
act_4m_irr =act_sat*(1-exp(-0.012*4));
natmos=act_4m_irr/(0.012/60);
natmos_sat=act_sat/(0.012/60);

printf("115In\n");
printf("atividade de at[U+FFFD][U+FFFD]%f\n",act_sat);
printf("\n");
printf("atividade 4 minutos a[U+FFFD][U+FFFD][U+FFFD]%f\n",↵
    act_4m_irr);
printf("\n");
printf("[U+FFFD]tmos 4 min a[U+FFFD] ind[U+FFFD][U+FFFD]%f e para↵
    a atividade de at[U+FFFD][U+FFFD]%f\n",natmos, ↵
    natmos_sat);
printf("\n");
for(int i; i<=15; i++)
{

```

```

act_m=act_4m_irr*exp(-0.012*i);
act_ac15m_v[i]=act_m ;

printf("atividade de 0 a 15 min")
printf(" %f\n", act_m);

}
for (int i=1; i<=15; i++)
{
    cont_ac =act_ac15m_v[i]*60 + cont_ac;
    printf("contagens acumuladas de 1 a 15 min")
    printf("%f\n", cont_ac);

}

}
else
    if (elemento=="vanadio")
    {
act_sat=(act_ext+act_ext_op)*1E-24*1.6E22+(act_meio+↔
    act_meio_op)*1E-24*9.4E21+(act_int+act_int_op)*1E↔
    -24*3.1E21;
act_4m_irr =act_sat*(1-exp(-0.184*4));
natmos=act_4m_irr/(0.184/60);
natmos_sat=act_sat/(0.184/60);

printf("51V\n");
printf("atividade de sat[U+FFFD][U+FFFD]%f\n",act_sat);
printf("\n");
printf("atividade 4 minutos q[U+FFFD]h ind[U+FFFD][U+FFFD]%f\n",↔
    act_4m_irr);
printf("\n");
printf("[U+FFFD]tmos 4 min q[U+FFFD]h ind[U+FFFD][U+FFFD]%f e para↔
    a atividade de sat[U+FFFD][U+FFFD]%f\n",natmos, ↔
    natmos_sat);
printf("\n");
for(int i; i<=15; i++)

```

```
    {
    act_m=act_4m_irr*exp(-0.184*i);
    act_ac15m_v[i]=act_m ;

    printf("atividade de 0 a 15 min")
    printf(" %f\n", act_m);

    }
    for (int i=1; i<=15; i++)
    {
        cont_ac =act_ac15m_v[i]*60 + cont_ac;
        printf("contagens acumuladas de 1 a 15 min")
        printf("%f\n", cont_ac);

    }
}
}
```

Simulação sala de radioterapia

Definiu-se em apenas um ficheiro, os volumes materiais meios para as diferentes configurações das esferas de Bonner utilizadas, transcrevendo-se de seguida o respectivo código:

```
//_____opcoes para escolha da esfera_____
//_____ "d_2_5"
//_____ "d_3"
//_____ "d_4_2"
//_____ "d_5"
//_____ "d_6"
//_____ "d_8"
//_____ "d_10"
//_____ "d_12"
//_____ "conjunto"

TString esfera ="d_5";

//definir geometrias e volumes para simular um feixe de fotoes 18 MeV - alvo-> ←
      3mm de W e 15 mm de Cu

//cilindro com vacuo
Double_t vrmin = 0.0;
Double_t vrmax = 0.2;
Double_t vdz = 10.0;
```

```

//cilindro tungstenio
Double_t wrmin = 0.0;
Double_t wrmax = 0.2;
Double_t wdz = 0.05;
//cilindro cobre (exterior ao alvo de tungstenio, usado para refino[U+FFFD][U+FFFD])
Double_t curmin = 0.2;
Double_t curmax = 1.5;
Double_t cudz = 0.75;
//cilindro exterior steel (subt[U+FFFD][U+FFFD] cobre + tungstenio)
Double_t steelmin=1.5;
Double_t steelmax=2;
Double_t steeldz=0.75;

//1 cilindro tungstenio - colimador primario
Double_t wfcmin =2;
Double_t wfcmax =3.5;
Double_t wfdz =0.75;

//cilindro grafite (usada para reter electroes que atravessam o alvo)
Double_t grafmin=0;
Double_t grafmax=0.2;
Double_t grafdz=0.65;
//colimador primario conico
Double_t wscdz =3.5;
Double_t wscminf =0.2;
Double_t wscmaxf =3.5;
Double_t wscmins =1.4;
Double_t wscmaxs =3.5;

//Flattening filter

Double_t ffdz =1.5;
Double_t ffminf =0;
Double_t ffmaxf =0;
Double_t ffmns =0;
Double_t ffmaxs =3.5;

```

```

// Volume com ar - representa a camara de ionizacao de transferencia
//-- utilizada para monitorizar a energia dos ft[U+FFFD] no ajuste da altura do ↔
    flattening filter ou energia dos electr[U+FFFD]s
Double_t cidz=1;
Double_t cirmin=0;
Double_t cirmax=3.5;

//Fantoma agua 1 arte da SSD <->SSD+10(reg[U+FFFD] de maior dep[U+FFFD] de energia<->
    ) 2 parte SSD+10<->SSD+20

Double_t detx=10;
Double_t dety=10;
Double_t detz=5;
//colimadores secundarios campo de radiacao quadrado 10X10
//eixoxx
Double_t csecxxesqxx =4;
Double_t csecxxesqyy =13;
Double_t csecxxesqzz =4;

Double_t csecxxdtoxx =4;
Double_t csecxxdtoyy =13;
Double_t csecxxdtozz =4;

// eixxyy
Double_t csecyyesqxx =13;
Double_t csecyyesqyy =4;
Double_t csecyyesqzz =4;

Double_t csecyydtoxx =13;
Double_t csecyydtoyy =4;
Double_t csecyydtozz =4;
//blindagem atr[U+FFFD] Linac
//sup camada Pb
Double_t bsupPbxx =16;
Double_t bsupPbyy =16;
Double_t bsupPbzz =1.5;

```

```

//sup camada w
Double_t bsupWxx =16;
Double_t bsupWyy =16;
Double_t bsupWzz =2;

//laterais xx Pb
Double_t latxxesqPbxx=1.5;
Double_t latxxesqPbyy =16;
Double_t latxxesqPbzz =41;

Double_t latxxdtaPbxx=1.5;
Double_t latxxdtaPbyy =16;
Double_t latxxdtaPbzz =41;

//laterais xx W
Double_t latxxesqWxx=2;
Double_t latxxesqWyy =16;
Double_t latxxesqWzz =41;

Double_t latxxdtaWxx=2;
Double_t latxxdtaWyy =16;
Double_t latxxdtaWzz =41;

//laterais yy Pb
Double_t latyyesqPbxx=15;
Double_t latyyesqPbyy =2;
Double_t latyyesqPbzz =41;

Double_t latyydtaPbxx=15;
Double_t latyydtaPbyy =2;
Double_t latyydtaPbzz =41;

//laterais yy W
Double_t latyyesqWxx=15;
Double_t latyyesqWyy =2;
Double_t latyyesqWzz =41;

```

```

Double_t latyydtaWxx=15;
Double_t latyydtaWyy =2;
Double_t latyydtaWzz =41;

//Sala

//base sala radioterapia
Double_t infxx= 600;
Double_t infyy =585;
Double_t infzz =50;
//topo sala radioterapia
Double_t supxx= 600;
Double_t supyy =585;
Double_t supzz =50;
//paredes blindagem primaria laterais
Double_t esqxx =100;
Double_t esqyy =450;
Double_t esqzz =200;

Double_t dtaxx =100;
Double_t dtayy =450;
Double_t dtazz = 200;

//paredes blindagem secundaria laterais

Double_t esqxx_s= 400;
Double_t esqyy_s= 50;
Double_t esqzz_s=200;

Double_t dtaxx_s= 200;
Double_t dtayy_s= 50;
Double_t dtazz_s=200;

//pardede blindagem primaria complemento

Double_t xx=100;

```

```
Double_t yy=110;
Double_t zz=200;

//parede blindagem secundaria labirinto

Double_t secxx=500;
Double_t secyy=50;
Double_t seczz=200;

//porta
//camada interior (chumbo)
Double_t pintxx=2.3;
Double_t pintyy=135;
Double_t pintzz=200;

//camada exterior (concreto)
Double_t pextxx=12.3;
Double_t pextyy=135;
Double_t pextzz=200;

//mesa tratamento estrutura (steel)

Double_t sup1xx =5;
Double_t sup1yy =5;
Double_t sup1zz =50;

Double_t sup2xx =5;
Double_t sup2yy =5;
Double_t sup2zz =50;

Double_t sup3xx =5;
Double_t sup3yy =5;
Double_t sup3zz =50;

Double_t sup4xx =5;
Double_t sup4yy =5;
Double_t sup4zz =50;
```

```

Double_t sup5xx =5;
Double_t sup5yy =100;
Double_t sup5zz =5;

Double_t sup6xx =5;
Double_t sup6yy =100;
Double_t sup6zz =5;

Double_t sup7xx=30;
Double_t sup7yy=100;
Double_t sup7zz=5;

//estrutura Linac

TGeoShape* Svacuo = new TGeoTube(vrmin, vrmax, vdz);
TGeoShape* Sw = new TGeoTube(wrmin, wrmax, wdz);
TGeoShape* Scu = new TGeoTube(curmin, curmax, cudz);
TGeoShape* csteel =new TGeoTube(steelmin, steelmax, steeldz);
TGeoShape* firstcolw_csup = new TGeoTube(wfcmin, wfcmax, wfc dz);
TGeoShape* grafite = new TGeoTube (grafmin, grafmax, graf dz);
TGeoShape* firstcolw_cinf= new TGeoCone(wscdz, wscminf, wscmaxf, wscmins, wscmaxs);
TGeoShape* flatt_filt =new TGeoCone (ffdz, ffminf, ffmaxf, ffmmins, ffmmaxs);
TGeoShape* ci =new TGeoTube (cirmin, cirmax, cidz);
TGeoShape* csecesqxx = new TGeoBBox(csecxxesqxx, csecxxesqyy, csecxxesqzz);
TGeoShape* csecdtoxx= new TGeoBBox(csecxxdtoxx, csecxxdtoyy, csecxxdtozz);
TGeoShape* csecesqyy = new TGeoBBox(csecyyesqxx, csecyyesqyy, csecyyesqzz);
TGeoShape* csecdtoyy= new TGeoBBox(csecyydtoxx, csecyydtoyy, csecyydtozz);
TGeoShape* bsupPb = new TGeoBBox(bsupPbxx, bsupPbyy, bsupPbzz);
TGeoShape* bsupW = new TGeoBBox(bsupWxx, bsupWyy, bsupWzz);
TGeoShape* latesqPbxx =new TGeoBBox(latxxesqPbxx, latxxesqPbyy, latxxesqPbzz);
TGeoShape* latesqWxx =new TGeoBBox(latxxesqWxx, latxxesqWyy, latxxesqWzz);
TGeoShape* latdtaPbxx =new TGeoBBox(latxxdtaPbxx, latxxdtaPbyy, latxxdtaPbzz);
TGeoShape* latdtaWxx =new TGeoBBox(latxxdtaWxx, latxxdtaWyy, latxxdtaWzz);

```

```

TGeoShape* latesqPbyy =new TGeoBBox(latyyesqPbxx, latyyesqPbyy, latyyesqPbzz);
TGeoShape* latesqWyy =new TGeoBBox(latyyesqWxx, latyyesqWyy, latyyesqWzz);
TGeoShape* latdtaPbyy =new TGeoBBox(latyydtaPbxx, latyydtaPbyy, latyydtaPbzz);
TGeoShape* latdtaWyy =new TGeoBBox(latyydtaWxx, latyydtaWyy, latyydtaWzz);
//TGeoShape* fant = new TGeoBBox(detx, dety, detz);
TGeoShape* fantdet= new TGeoBBox(detx, dety, detz);

//sala radioterapia + porta
TGeoShape* base= new TGeoBBox(infxx, infyy, infzz);
TGeoShape* topo = new TGeoBBox(supxx, supyy, supzz);
TGeoShape* large_esq = new TGeoBBox (esqxx, esqyy, esqzz);
TGeoShape* large_dta = new TGeoBBox (dtaxx, dtayy, dtazz);
TGeoShape* small_esq = new TGeoBBox (esqxx_s, esqyy_s, esqzz_s);
TGeoShape* small_dta = new TGeoBBox (dtaxx_s, dtayy_s, dtazz_s);
TGeoShape* par_compl =new TGeoBBox (xx, yy, zz);
TGeoShape* sec      =new TGeoBBox (secxx, secyy, seczz);
TGeoShape* pint     =new TGeoBBox (pintxx, pintyy, pintzz);
TGeoShape* pext     =new TGeoBBox(pextxx, pextyy, pextzz);
//acessorios
TGeoShape* sup1tesq =new TGeoBBox(sup1xx, sup1yy, sup1zz);
TGeoShape* sup2tdta =new TGeoBBox(sup2xx, sup2yy, sup2zz);
TGeoShape* sup3fesq =new TGeoBBox(sup3xx, sup3yy, sup3zz);
TGeoShape* sup4fdta =new TGeoBBox(sup3xx, sup3yy, sup3zz);
TGeoShape* sup5hesq =new TGeoBBox(sup5xx, sup5yy, sup5zz);
TGeoShape* sup6hdta =new TGeoBBox(sup6xx, sup6yy, sup6zz);
TGeoShape* sup7hdta =new TGeoBBox(sup7xx, sup7yy, sup7zz);

//esferas
//esfera 2_5"
TGeoShape* esexteriorf_2_5 = new TGeoSphere("frente_2_5",0.0, 3.175, 0.0, 90, ←
0.0, 360.0);
TGeoShape* esexterioro_2_5 = new TGeoSphere("oposta2_5",0.0, 3.175, 90.0, ←
180.0, 0.0, 360.0);
TGeoShape* ciinterior = new TGeoTube(0, 2, 0.2);
TGeoShape* ciexterior_2_5 = new TGeoTube(2, 3.175, 0.2);
//esfera3"

```

```

TGeoShape* esexteriorf_3 = new TGeoSphere("frente_3",0.0, 3.81, 0.0, 90.0, 0.0,↔
    360.0);
TGeoShape* esexteriorort_3 = new TGeoSphere("oposta_3",0.0, 3.81, 90.0, 180.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_3 = new TGeoTube(0.5, 3.81, 0.005);
//esfera 4_2"
TGeoShape* esexteriorf_4_2 = new TGeoSphere("frente_4_2",0.0, 5.33, 0.0, 90.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* esexteriorort_4_2 = new TGeoSphere("oposta_4_2",0.0, 5.33, 90.0, ↔
    180.0, 0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_4_2 = new TGeoTube(0.5, 5.33, 0.005);
//esfera 5"
TGeoShape* esexteriorf_5 = new TGeoSphere("frente_5",0.0, 6.35, 0.0, 90.0, 0.0,↔
    360.0);
TGeoShape* esexteriorort_5 = new TGeoSphere("oposta_5",0.0, 6.35, 90.0, 180.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_5 = new TGeoTube(2, 6.35, 0.2);
//esfera 6"
TGeoShape* esexteriorf_6 = new TGeoSphere("frente_6",0.0, 7.62, 0.0, 90.0, 0.0,↔
    360.0);
TGeoShape* esexteriorort_6 = new TGeoSphere("oposta_6",0.0, 7.62, 90.0, 180.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_6 = new TGeoTube(0.5, 7.62, 0.005);
//esfera 8"
TGeoShape* esexteriorf_8 = new TGeoSphere("frente_8",0.0, 10.16, 0.0, 90.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* esexteriorort_8 = new TGeoSphere("oposta_8",0.0, 10.16, 90.0, 180.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_8 = new TGeoTube(0.5, 10.16, 0.005);
//esfera 10"
TGeoShape* esexteriorf_10 = new TGeoSphere("frente_10",0.0, 12.7, 0.0, 90.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* esexteriorort_10 = new TGeoSphere("oposta_10",0.0, 12.7, 90.0, 180.0, ↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_10 = new TGeoTube(0.5, 12.7, 0.005);
//esfera 12"
TGeoShape* esexteriorf_12 = new TGeoSphere("frente_12",0.0, 15.24, 0.0, 90.0, ↔

```

```

    0.0, 360.0);
TGeoShape* esexterior_12 = new TGeoSphere("oposta_12",0.0, 15.24, 90.0, 180.0,↔
    0.0, 360.0);
TGeoShape* ciexterior_12 = new TGeoTube(0.5, 15.24, 0.005);

//volumes esferas
//esfera 2_5

    TGeoVolume* sexteriorf_2_5 = new TGeoVolume ("spherefrente_2_5", ↔
        esexteriorf_2_5, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* sexterior_2_5 = new TGeoVolume ("spheretras_2_5", ↔
        esexterior_2_5, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* scexterior_2_5 = new TGeoVolume ("cilindroexterior_2_5", ↔
        ciexterior_2_5, pMedPolyethylene );
    TGeoVolume* scinteriorv = new TGeoVolume ("cilindrointerv", ↔
        ciinterior, pMedV);
    //AddSensitiveVolume(scinteriorv_2_5);
//esfera 3

    TGeoVolume* sexteriorf_3 = new TGeoVolume ("spherefrente_3", ↔
        esexteriorf_3, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* sexterior_3 = new TGeoVolume ("spheretras_3", ↔
        esexterior_3, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* scexterior_3 = new TGeoVolume ("cilindroexterior_3", ↔
        ciexterior_3, pMedPolyethylene );
//esfera 4

    TGeoVolume* sexteriorf_4_2 = new TGeoVolume ("spherefrente_4_2", ↔
        esexteriorf_4_2, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* sexterior_4_2 = new TGeoVolume ("spheretras_4_2", ↔
        esexterior_4_2, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* scexterior_4_2 = new TGeoVolume ("cilindroexterior_4_2", ↔
        ciexterior_4_2, pMedPolyethylene );
//esfera 5

    TGeoVolume* sexteriorf_5 = new TGeoVolume ("spherefrente_5", ↔
        esexteriorf_5, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* sexterior_5 = new TGeoVolume ("spheretras_5", ↔
        esexterior_5, pMedPolyethylene);
    TGeoVolume* scexterior_5 = new TGeoVolume ("cilindroexterior_5", ↔

```

```

        ciexterior_5 , pMedPolyethylene );
//esfera 6
TGeoVolume* sexteriorf_6 = new TGeoVolume ( "spherefrente_6" , ←
        esexteriorf_6 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* sexterior_6 = new TGeoVolume ( "spheretras_6" , ←
        esexterior_6 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* scexterior_6 = new TGeoVolume ( "cilindroexterior_6" , ←
        ciexterior_6 , pMedPolyethylene );
//esfera 8
TGeoVolume* sexteriorf_8 = new TGeoVolume ( "spherefrente_8" , ←
        esexteriorf_8 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* sexterior_8 = new TGeoVolume ( "spheretras_8" , ←
        esexterior_8 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* scexterior_8 = new TGeoVolume ( "←
        cilindroexterior_8" , ciexterior_8 , pMedPolyethylene );
//esfera 10
TGeoVolume* sexteriorf_10 = new TGeoVolume ( "spherefrente_10" , ←
        esexteriorf_10 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* sexterior_10 = new TGeoVolume ( "spheretras_10" , ←
        esexterior_10 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* scexterior_10 = new TGeoVolume ( "←
        cilindroexterior_10" , ciexterior_10 , pMedPolyethylene );
//esfera 12
TGeoVolume* sexteriorf_12 = new TGeoVolume ( "spherefrente_12" , ←
        esexteriorf_12 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* sexterior_12 = new TGeoVolume ( "spheretras_12" , ←
        esexterior_12 , pMedPolyethylene);
TGeoVolume* scexterior_12 = new TGeoVolume ( "←
        cilindroexterior_12" , ciexterior_12 , pMedPolyethylene );

//Linac
TGeoVolume* tubvacuo = new TGeoVolume ( "cilindro_vacuo" , Svacuo , pMedVacuo);
TGeoVolume* tubw = new TGeoVolume ( "cilindro_tung" , Sw , pMedW);
TGeoVolume* tubcu = new TGeoVolume ( "cilindro_cobre" , Scu , pMedCu);
//TGeoVolume* Sfant = new TGeoVolume ( "cilindro_detector" , fant , pMedAgua);

```

```

TGeoVolume* Sfantdet = new TGeoVolume ("cilindro_detector", fantdet, pMedAgua↵
);
AddSensitiveVolume(Sfantdet);
TGeoVolume* Scsteel= new TGeoVolume("steel_sistema[U+FFFD][U+FFFD]_alvo", csteel, pMedSteel↵
);
TGeoVolume* Sfirstcolw_csup = new TGeoVolume ("colimador_primario_superior", ↵
firstcolw_csup, pMedW);
TGeoVolume* Sgrafite = new TGeoVolume ("grafite_reter_electroes", grafite, ↵
pMedGrafite);
TGeoVolume* Sfirstcolw_cinf = new TGeoVolume ("colimador_primario_inferior", ↵
firstcolw_cinf, pMedW);
TGeoVolume* Sflatt_filt = new TGeoVolume ("flattening filter", flatt_filt, ↵
pMedSteel);
TGeoVolume* Sci = new TGeoVolume ("camara_ion_transf", ci, pMedAir);
TGeoVolume* Scsecxxesq = new TGeoVolume ("c_sec_xx_Esq", csecesqxx, pMedW);
TGeoVolume* Scsecxxdto = new TGeoVolume ("c_sec_xx_Dto", csecdtoxx, pMedW);
TGeoVolume* Scsecyyesq = new TGeoVolume ("c_sec_xx_Esq", csecesyqy, pMedW);
TGeoVolume* Scsecyydto = new TGeoVolume ("c_sec_xx_Dto", csecdtoyy, pMedW);
TGeoVolume* SbsupPb = new TGeoVolume ("blinda_sup_pb", bsupPb, pMedPb);
TGeoVolume* SbsupW = new TGeoVolume ("blinda_sup_W", bsupW, pMedW);
TGeoVolume* SlatdqPbxx =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_xx_Pb", latesqPbxx, ↵
pMedPb);
TGeoVolume* SlatdqWxx =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_xx_W", latesqWxx, pMedW);
TGeoVolume* SlatdtaPbxx =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_xx_Pb", latdtaPbxx, ↵
pMedPb);
TGeoVolume* SlatdtaWxx =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_xx_W", latdtaWxx, pMedW);

TGeoVolume* SlatdqPbyy =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_yy_Pb", latesqPbyy, ↵
pMedPb);
TGeoVolume* SlatdqWyy =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_yy_W", latesqWyy, pMedW);
TGeoVolume* SlatdtaPbyy =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_yy_Pb", latdtaPbyy, ↵
pMedPb);
TGeoVolume* SlatdtaWyy =new TGeoVolume ("blind_lat_esq_yy_W", latdtaWyy, pMedW);

//sala radioterapia
TGeoVolume * Sbase = new TGeoVolume ( "base_sala_rad", base, pMedConcreto);

```

```

TGeoVolume *Stopo = new TGeoVolume ("topo_sala_rad", topo, pMedConcreto);
TGeoVolume *Slarge_esq = new TGeoVolume ("paredes_large_esq", large_esq, ←
    pMedConcreto);
TGeoVolume *Slarge_dta = new TGeoVolume ("paredes_large_dta", large_dta, ←
    pMedConcreto);
TGeoVolume *Ssmall_esq = new TGeoVolume ("paredes_small_esq", small_esq, ←
    pMedConcreto);
TGeoVolume *Ssmall_dta = new TGeoVolume ("paredes_small_dta", small_dta, ←
    pMedConcreto);
TGeoVolume *Spar_compl = new TGeoVolume ("complemento_paredes_large_dta", ←
    par_compl, pMedConcreto);
TGeoVolume *Ssec = new TGeoVolume ("paredes_secundaria_lab", sec, ←
    pMedConcreto);
TGeoVolume *Spint = new TGeoVolume ("parte_interna_porta", pint, pMedPb);
TGeoVolume *Spext = new TGeoVolume ("parte_externa_porta", pext, ←
    pMedConcreto);
//auxiliares
TGeoVolume *Ssup1tesq = new TGeoVolume ("suporte_mes_t_esq", sup1tesq, ←
    pMedSteel);
TGeoVolume *Ssup2tdta = new TGeoVolume ("suporte_mes_t_dta", sup2tdta, ←
    pMedSteel);
TGeoVolume *Ssup3fesq = new TGeoVolume ("suporte_mes_t_esq", sup3fesq, ←
    pMedSteel);
TGeoVolume *Ssup4fdta = new TGeoVolume ("suporte_mes_t_dta", sup4fdta, ←
    pMedSteel);
TGeoVolume *Ssup5hesq = new TGeoVolume ("suporte_mes_h_esq", sup5hesq, ←
    pMedSteel);
TGeoVolume *Ssup6hdta = new TGeoVolume ("suporte_mes_h_dta", sup6hdta, ←
    pMedSteel);
TGeoVolume *Ssup7hdta = new TGeoVolume ("suporte_mes_h_superf", sup7hdta, ←
    pMedBak);

TGeoRotation *rot = new TGeoRotation("rot",0,0,0);
Double_t tx = 0.0;
Double_t ty = 0.0;
Double_t tz = 0.0;

```

```

TGeoVolume*LINAC = new TGeoVolumeAssembly("sala_radioterapia");
//estrutura sala radioterapia
tz=-250;
ty=135;
LINAC->AddNode(Sbase, 11, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=250;
LINAC->AddNode(Stopo, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=0;
tz=0;
tx=-500;
LINAC->AddNode(Slarge_dta, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=500;
LINAC->AddNode(Slarge_esq, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=0;
ty=-400;
LINAC->AddNode(Ssmall_esq, 15, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=400;
tx=-200;
LINAC->AddNode(Ssmall_dta, 16, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=500;
ty=510;
LINAC->AddNode(Spar_compl, 17, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=100;
ty=670;
LINAC->AddNode(Ssec, 18, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=-402.3;
ty=485;
LINAC->AddNode(Spint, 19, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=tx-2.3-13.5;
LINAC->AddNode(Spext, 20, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

//estrutura Linac
tx=0;
ty=0;
tz=-40;
LINAC->AddNode(tubvacuo, 21, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

```

```

tz=tz+10.0 + 0.05;
LINAC->AddNode(tubw, 22, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+0.70;
LINAC->AddNode(tubcu, 23, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(Scsteel, 24, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(Sfirstcolw_csup, 25, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(Sgrafite, 25, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+3.5+0.75;
LINAC->AddNode(Sfirstcolw_cinf, 26, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+3.4+3.5;
LINAC->AddNode(Sflatt_filt, 27, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+2.0+3.4;
LINAC->AddNode(Sci, 28, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+1+5+8;
tx=6;
LINAC->AddNode(Scsecxxdto, 29, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=-6;
LINAC->AddNode(Scsecxxesq, 30, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+9;
tx=0;
ty=6.5;
LINAC->AddNode(Scsecyydto, 31, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=-6.5;
LINAC->AddNode(Scsecyyesq, 32, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=0;
ty=0;
tz=-65+0.5;
LINAC->AddNode(SbsubPb, 33, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+3.5;
LINAC->AddNode(SbsubW, 34, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=tz+40;
tx=-17.5;
LINAC->AddNode(SlatesqPbxx, 35, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=-14.5;
LINAC->AddNode(SlatesqWxx, 36, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=17.5;

```

```

LINAC->AddNode(SlatdtaPbxx, 37, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=14.5;
LINAC->AddNode(SlatdtaWxx, 38, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=-21;
tx=0;
ty=-17.5;
LINAC->AddNode(SlatesqPbyy, 39, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=-14.5;
LINAC->AddNode(SlatesqWyy, 40, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=17.5;
LINAC->AddNode(SlatdtaPbyy, 41, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=14.5;
LINAC->AddNode(SlatdtaWyy, 42, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=0;
ty=0;
//tz= 75;
//LINAC->AddNode(Sfant, 43, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(Sfantdet, 44, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

//acessorios
tz=150;
tx=-30;
ty=-130;
LINAC->AddNode(Ssup1tesq, 45, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=30;
LINAC->AddNode(Ssup2tdta, 46, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
ty=70;
tx=-30;
LINAC->AddNode(Ssup3fesq, 47, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tx=30;
LINAC->AddNode(Ssup4fdta, 48, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=102.5;
ty=-30;
tx=-30;
LINAC->AddNode(Ssup5hesq, 49, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

```

```

tx=30;
LINAC->AddNode(Ssup6hdta , 50, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=100;
tx=0;
LINAC->AddNode(Ssup7hdta , 51, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

//esferas

if (esfera=="d_2_5")
{
ty=0;
tz=75.005;
tx=50;
LINAC->AddNode(sexteriorf_2_5 , 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(scinteriorv , 53, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(scexterior_2_5 , 54, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(sexteriort_2_5 , 55, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
}
else
    if(esfera=="d_3")
    {
        ty=0;
        tz=75.005;
        tx=50;
        LINAC->AddNode(sexteriorf_3 , 56, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        tz=75;
        LINAC->AddNode(scinteriorv , 57, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        LINAC->AddNode(scexterior_3 , 58, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        tz=74.995;
        LINAC->AddNode(sexteriort_3 , 59, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
    }
}

```

```

else
    if(esfera=="d_4_2")
    {
        ty=0;
        tz=75.005;
        tx=50;
        LINAC->AddNode(sexteriorf_4_2, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot)←
            ;
        tz=75;
        LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        LINAC->AddNode(scxterior_4_2, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot)←
            ;
        tz=74.995;
        LINAC->AddNode(sexteriort_4_2, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot)←
            ;
    }
else
    if(esfera=="d_5")
    {
        ty=0;
        tz=75.2;
        tx=50;
        LINAC->AddNode(sexteriorf_5, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot←
            ));
        tz=75;
        LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot)←
            );
        LINAC->AddNode(scxterior_5, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot←
            ));
        tz=74.8;
        LINAC->AddNode(sexteriort_5, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot←
            ));
    }

else

```

```

if(esfera=="d_6")
{
    ty=0;
    tz=75.005;
    tx=50;
    LINAC->AddNode(sexteriorf_6, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ←
        rot));
    tz=75;
    LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ←
        rot));
    LINAC->AddNode(scxterior_6, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ←
        rot));
    tz=74.995;
    LINAC->AddNode(sexterior_6, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, ←
        rot));
}
else
    if(esfera=="d_8")
    {
        ty=0;
        tz=75.005;
        tx=50;
        LINAC->AddNode(sexteriorf_8, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ←
            ty, tz, rot));
        tz=75;
        LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ←
            ty, tz, rot));
        LINAC->AddNode(scxterior_8, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ←
            ty, tz, rot));
        tz=74.995;
        LINAC->AddNode(sexterior_8, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ←
            ty, tz, rot));
    }
    else
        if(esfera=="d_10")

```

```

        {
            ty=0;
            tz=75.005;
            tx=50;
            LINAC->AddNode(sexteriorf_10, 52, new ↔
                TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
            tz=75;
            LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new ↔
                TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
            LINAC->AddNode(scxterior_10, 13, new ↔
                TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
            tz=74.995;
            LINAC->AddNode(sexteriort_10, 14, new ↔
                TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
        }
        else
            if (esfera=="d_12")
            {
                ty=0;
                tz=75.005;
                tx=50;
                LINAC->AddNode(sexteriorf_12, 52, new ↔
                    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
                tz=75;
                LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new ↔
                    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
                LINAC->AddNode(scxterior_12, 13, new ↔
                    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
                tz=74.995;
                LINAC->AddNode(sexteriort_12, 14, new ↔
                    TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
            }
    else
        if (esfera=="conjunto")
    {

```

```

tx=50;
ty=-68,825;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(s exteriorf_2_5, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(sc interiorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(sc exterior_2_5, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(s exteriort_2_5, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=-59,84;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(s exteriorf_3, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(sc interiorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(sc exterior_3, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(s exteriort_3, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=-48,696;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(s exteriorf_4_2, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(sc interiorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(sc exterior_4_2, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(s exteriort_4_2, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=-35,012;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(s exteriorf_5, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(sc interiorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(sc exterior_5, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

```

```

tz=74.995;
LINAC->AddNode(ssexterioirt_5, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=-19,042;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(ssexteriorf_6, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(scxterior_6, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(ssexterioirt_6, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=0.73;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(ssexteriorf_8, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(scxterior_8, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(ssexterioirt_8, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=25.598;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(ssexteriorf_10, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=75;
LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(scxterior_10, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(ssexterioirt_10, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

tx=50;
ty=55,538;
tz=75.005;
LINAC->AddNode(ssexteriorf_12, 52, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));

```

```
tz=75;
LINAC->AddNode(scinteriorv, 12, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
LINAC->AddNode(sce exterior_12, 13, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
tz=74.995;
LINAC->AddNode(sexterior_12, 14, new TGeoCombiTrans(tx, ty, tz, rot));
}
```

Espectro utilizado nas simulação da actividade

Na definição do elemento a utilizar como detector, passivo, para ponderação da actividade para as diferentes esferas, foi gerado um espectro com 15×10^5 eventos, com fracção de neutrões epitérmicos térmicos e rápidos, correspondentes ao espectro típico de um LINAC a produzir feixe de fótons de 15 MeV. Utilizou-se para a sua geração o seguinte código:

```
r out_file_name[40];
char buffer[400];
double n_termico, n_epitermico, n_rapido;
double gaus_factor, energy_n, a;

double teta, phi, total_momentum, px,py,pz, p;

TH1F *neutron_spectrum;

sprintf(out_file_name, "evt_gen_neutrons.dat");

ofstream outfile(out_file_name);

neutron_spectrum = new TH1F("neutron_spectrum", "neutron_spectrum", 1e6, 2e-13, 2e-2);

for(int ii=1; ii<1E1; ii++)
```

```

{

a = gRandom->Rndm(ii);

if (a<0.75)
{
gaus_factor = gRandom->Gaus(0.5,0.5/3);

energy_n = 2e-4 * pow(10, 2*gaus_factor - 1.0);

// printf("a %f, %f \n",a,energy_n);

}
else if(a>=0.75 && a<=0.80)
{
energy_n =gRandom->Rndm(ii)*(1E-5-1E-10)+1E-10;

}
else if (a>0.8)
{
gaus_factor = gRandom->Gaus(0.5,0.5/3); // (randon gaussianai media↔
centro pico e desvio peadrao largura meia altura);

energy_n = 2.5e-11 * pow(10, 2*gaus_factor - 1.0);

}

p=sqrt((energy_n+0.93957)**2-0.93957**2);
teta=gRandom->Rndm(ii)*180; //angulo definido em funcao do diametro da ↔
esfera
phi=gRandom->Rndm(ii)*360;
px=sin(teta)*sin(phi)*p;
py=sin(teta)*cos(phi)*p;
pz=cos(teta)*p;

buffer_size = sprintf(buffer,"%d 1 %f 0 \n",ii,p);

```

```
outfile.write(buffer,buffer_size);

buffer_size = sprintf(buffer,"1 0 2112 %f %f %f 0.0 0.0 -1000.0 \n",px,↔
    py,pz);
outfile.write(buffer,buffer_size);

}
```

References

- [1] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. *Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators (N C R P Report)*. Natl Council on Radiation, 1984-04. [1](#)
- [2] R.I. BRAMBLETT, R.L.; EWING AND T. W. BONNER. A new type of neutron spectrometer. *Nucl. Instr. Meth.* *9*, 1960. [1](#)
- [3] K. HOHLFELD P. ANDREO, D. T. BURNS. *RADIATION ONCOLOGY PHYSICS: A HANDBOOK FOR TEACHERS AND STUDENTS*. IAEA in Austria, 2000. [4](#), [27](#)
- [4] J.C. ROSENWALD P. MAYLES, A. NAHUM. *Handbook of radiotherapy physics: Theory and practice*. TaylorsFrancis, 2007. [4](#)
- [5] BRIGIDA FERREIRA. Photon external radiation therapy. Oral Presentation, Physics for Health Summer School, 2010. [6](#), [8](#)
- [6] STRAHLENTHER. ONKOL. *The Radiobiological and physical basis of radiotherapy with protons and heavy ions*. 1990. [9](#)
- [7] ATTIX AND TOCHILIN. *Radiation Dosimetry, volume 1-3*. 1969. [14](#)
- [8] ICRP 2007. Recommendations of the international commission on radiological protection icrp publication 103. 2007. [21](#)
- [9] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENT ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. *Report 51*, 1993. [22](#)

REFERENCES

- [10] THOMAS P. WANGLER. *Principles of RF linear accelerators*. ISBN 0-471-16814-9. 25
- [11] EIJI TANABE C.J. KARZMARK, CRAIG S. NUNAN. *Medical electron accelerators*. ISBN-07-105410. 25
- [12] KENNETH S. KRANE. *Introductory Nuclear Physics*. Jonh Wiley Sons, 1988. 30
- [13] M. SPIRO JEAN-LOUIS BASDEVANT, J. RICH. *Fundamentals in Nuclear Physics*. Springer, 2004. 32
- [14] ATLAS OF NEUTRON CAPTURE CROSS SECTIONS NGATLAS. <http://www-nds.iaea.org/ngatlas2/>. 33, 34, 116
- [15] JS. CIERJACKS E R. E. CHRIEN. *Neutron radiative Capture*,. 1984. 35
- [16] EVALUATED NUCLEAR DATA FILE (ENDF). <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endf02.js>. 37
- [17] R. BEDOGNI. Neutron spectrometry with bonner spheres. Oral Presentation. 38, 39, 77
- [18] ALFREDO C. SIOCHI. *Description of the Siemens Primus accelerator with the serial number 3362 for simulation in BEAM*. 2001. 42
- [19] F FASOLO² C ONGARO² L VISCA³ U NASTASI⁴ K W BURN⁵ G SCIELZO⁶ J O ADLER⁷ J R M ANNAND⁸ A ZANINI¹, E DURISI² AND G ROSNER⁸. Monte carlo simulation of the photoneutron field in linac radiotherapy treatments with different collimation systemsmonte carlo simulation of the photoneutron field in linac radiotherapy treatments with different collimation systems. 2004. 42
- [20] GÓMEZ J.L. MUÑIZ⁵ R. BARQUERO M.J. GARCÍA-FUSTÉ³ G. HARTMANN F.SANCHEZ-DOBLADO, C. DOMINGO³. Medida de los espectros neutrónicos en las salas de tratamiento de diversos aceleradores de electrones mediante un sistema de esferas de bonner con detectores de activación de au. 2008, 2008. 43, 62, 65

REFERENCES

- [21] ADOLFO APOSITO FRANCISCO FERNANDEZ ROBERTO BEGDIGNU, CARLES DOMINGO. *nuclear instruments and Methods in physics Research A 580*, 2007. [46](#)
- [22] IAEA 2001. *International Atomic Energy Agency - Technical Reports Series n. 403, Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes. Supplement to Technical Report Series No. 318*. Vienna, 2001. [48](#)
- [23] D. E. RAESIDE. *Monte Carlo principles and application*. 1976 ISSN 00319155 (ISSN), 1976. [56](#)
- [24] ROOT TEAM. *The Root User Guide*. 2009. [58](#)
- [25] GÓMEZ J.L. MUÑIZ R. BARQUERO M.J. GARCÍA-FUSTÉ G. HARTMANN F.SANCHEZ-DOBLADO, C. DOMINGO. Online neutron dose evaluation in patients under radiotherapy. [62](#)
- [26] R. BEDOGNI. Neutron spectrometry with bonner spheres. Oral Presentation, Physics for Health Summer School, 2010. [62](#)
- [27] R.M.FLEMING R.M.LINDSTROM. Neutron self-shielding for simple geometries. *Revisited, Chem. Anal. (Warsaw) 53*, 2009. [75](#)
- [28] W. RUMHM S. GARNY, V. MARES. Response functions of a bonner sphere spectrometer calculated with geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009. [77](#)
- [29] FRANKEL S.C. GOSWAMI. A CHO H.D., FIRSTONE R.B. *Database of Prompt Gamma Ray from Slow Neutrons*. Viena, 2006. [80](#)
- [30] P. S. PEDROSA* E S. GAVAZZA**. Uma proposta para o cálculo da blindagem da porta e da parede externa do labirinto da sala de radioterapia médica. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, **17**, 2004. [89](#)
- [31] ISABEL CRISTINA POQUET SALINAS. *DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE BLINDAGEM PARA CONSTRUÇÕES TIPICAMENTE BRA-*

REFERENCES

- SILEIRAS*. PhD thesis, COPPE/UFRJ, Departamaneto eng. Nuclear, 2006. 90
- [32] SIEMENS. <http://www.siemens.com/medical>. 91
- [33] CHRISTIAN JAHANNES SCHELZ. *Development and evaluation od advanced dose calculation for medical radiation therapy technics*. PhD thesis, University of Heidelberg, 2004. 91