



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ESTUDO DA ATIVAÇÃO DE METAIS DE UM VASO DE PRESSÃO DO REATOR QUANDO SUBMETIDOS À RADIAÇÃO DE PRÓTONS

Paulo Caixeta de Oliveira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Antonio Carlos Marques Alvim

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

ESTUDO DA ATIVAÇÃO DE METAIS DE UM VASO DE PRESSÃO DO REATOR
QUANDO SUBMETIDOS À RADIAÇÃO DE PRÓTONS

Paulo Caixeta de Oliveira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Prof. Dilson Silva dos Santos

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO de 2015

Oliveira, Paulo Caixeta de

Estudo Da Ativação De Metais De Um Vaso De Pressão Do Reator Quando Submetidos À Radiação De Prótons/ Paulo Caixeta de Oliveira – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2015.

XI, 68 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Carlos Marques Alvim

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/ Engenharia Nuclear, 2015.

Referencias Bibliográficas: p. 47

1. Ativação. 2. Decaimento. 3. Penetração de íons. 4. Radiação de prótons I. Antonio Carlos Marques Alvim. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Estudo Da Ativação De Metais De Um Vaso De Pressão Do Reator Quando Submetidos À Radiação De Prótons

Per ardua ad alta

Agradecimentos

À minha família, que sempre me ofereceu todo o apoio necessário, em especial à minha mãe.

A todos os funcionários que viabilizam meu aprendizado: aos professores dos diversos departamentos da UFRJ envolvidos e aos funcionários que cuidam da limpeza e organização da universidade, e tantos outros que fazem tudo isso possível.

Ao meu orientador, prof. Alvim, e aos meus colegas de turma, que ao longo do curso sempre estiveram ao meu lado.

Ao CNPq, pela oportunidade de bolsa fornecida para a realização deste projeto.

Aos doutores Brian Connolly e Chris Cooper pela ajuda e orientação na execução do projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

ESTUDO DA ATIVAÇÃO DE METAIS DE UM VASO DE PRESSÃO DO REATOR QUANDO SUBMETIDOS À RADIAÇÃO DE PRÓTONS

Paulo Caixeta de Oliveira

Agosto/2015

Orientador: Antonio Carlos Marques Alvim

Curso: Engenharia Nuclear

O objetivo deste projeto foi investigar os efeitos da exposição dos aços RR10D (0,05% em peso de Cu) e RR15F (0,3% em peso de Cu), que são usados na fabricação de vasos de pressão do reator, à radiação de prótons. Primeiramente eles foram expostos à prótons com energias de 1, 3, 9, 20 e 30 MeV e suas atividades foram medidas ao longo de vários dias para acompanhar seu decaimento. Este procedimento foi então repetido com camadas laminadas de Fe para investigar a penetração do íon no metal. O próton incidente tinha 3,9 e 20 MeV de energia e a temperatura de todos os experimentos foi mantida constante e por volta de 30°C.

Palavras-chave: Radiação de Prótons, Ativação, Decaimento, Penetração de Íons.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

STUDY OF REACTOR PRESSURE VESSEL METAL ACTIVATION WHEN
SUBMITTED TO PROTON IRRADIATION

Paulo Caixeta de Oliveira

August /2015

Advisor: Antonio Carlos Marques Alvim

Course: Nuclear Engineering

The aim of this project was to investigate the effects of proton beam exposure on various aspects of reactor pressure vessel steels 10D (0.05 wt% Cu) and 15F (0.3wt% Cu). Firstly we investigated the effect of the exposure of the steel to 1, 3, 9, 20 and 30MeV proton beams and measured the activity over several days to track its decay. All of the experiments mentioned above were repeated with layered Fe foil to investigate the penetration of the ion beam into the steel. The proton beam incident energy was 3,9 and 20 MeV and temperature kept approximately at 30°C.

Keywords: Proton Beams Irradiation, Activation, Decay, Ion Penetration, Reactor Pressure Vessel Metal irradiation

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3 TEORIA 5	
3.1 Interação da radiação com a matéria	5
3.1.1 Interação do nêutron com a matéria	5
3.1.2 Interação do próton com a matéria	5
3.1.3 Interação do fóton com a matéria	6
3.1.3.1 Absorção fotoelétrica.....	7
3.1.3.2 Espalhamento Compton.....	7
3.1.3.3 Produção de pares	8
3.2 Análise de um espectro.....	9
3.3 Diferenças entre radiação de nêutrons e íons	9
3.4 Considerações experimentais	10
4 APARELHAGEM.....	13
4.1 Funcionamento e noções básicas de um ciclotron.....	13
4.2 Detetor HPGe	14
4.2.1 Calibração.....	14
4.2.2 Resolução.....	15
4.2.3 Eficiência.....	16
5 ANÁLISE DE SEGURANÇA	17
5.1 Limites de dose.....	17
5.2 Prática experimental	17
5.3 Avaliação da dose.....	18
5.3.1 Cálculos	19
5.3.2 Comparação e conclusão	20
6 ATIVAÇÃO	21
6.1 Modelagem	21

6.1.1 Visão geral do processo de modelagem	21
6.1.2 TRIM	21
6.1.2 Código em Fortran.....	23
6.2 Resultados e Análise.....	28
6.2.1 Procedimentos de Irradiação	28
6.2.2 Medindo as amostras	29
6.2.3 Resultados.....	30
6.2.3.1 Conclusões preliminares.....	30
6.2.3.2 Alto teor de cobre (RR F15).....	31
6.2.3.3 Baixo teor de cobre (RR D10).....	33
6.2.3.4 Folhas de ferro	35
7 CONCLUSÃO.....	37
Referências.....	39
Apêndice I.....	41
Apêndice II.....	44

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de um vaso de pressão de um reator à água pressurizada	1
Figura 2.....	6
Figura 3 – As três principais interações entre fótons e a material.....	7
Figura 4 – Espalhamento Compton entre um fóton e um elétron.....	8
Figura 5 – Foto da tela do programa Maestro, mostrando um espectro da amostra irradiada (Baixo teor de cobre, a 30 MeV).....	9
Figura 6 – Perfil de dano para nêutrons de 1MeV, prótons de 3,2 MeV e íons de Ni+2 a 5MeV no aço inoxidável	11
Figura 7 – Comportamento dos parâmetros do feixe-alvo como função de um feixe de prótons irradiados a 360°C.....	12
Figura 8 – Desenho feito para explicar a esquemática do cyclotron MC40.....	13
Figura 9 – Potenciais do D1 e D2 numa órbita circular (http://www.np.ph.bham.ac.uk/pic/cyclotron - acessado em 04/05/2014).....	14
Figura 10 – Gráfico dos resultados obtidos para a calibração.....	15
Figura 11 – Gráfico dos resultados obtidos para a resolução.....	16
Figura 12 – Gráfico dos resultados obtidos para a eficiência.....	17
Figura 13 –Dados medidos da taxa de dose para a amostra irradiada a 9MeV	19
Figura 14 –Decaimento da taxa de dose para amostra de alto teor de cobre, irradiada a 9MeV	20
Figura 15 – Tela do TRIM, pronto para a simulação	22
Figura 16 – Evolução da energia do próton conforme ele adentra o alvo.....	23
Figura 17 –Atividade X profundidade após 1 semana da irradiação.....	24
Figura 18 – Atividade simulada ao longo de uma semana usando a atividade à maior profundidade	24
Figura 19 – Comparação entre o pico de Bragg do FORTRAN e do SRIM.....	25
Figura 20 –Atividade inicial X energia do feixe	25
Figura 21 – Decaimento das energias do ⁵⁵ Co.....	27
Figura 22 – Vista geral do Maestro	30
Figura 23 – Gráfico mostrando as contagens por segundo X tempo para diversas..	31
Figura 24 – Gráfico mostrando o decaimento do pico de 511 KeV	32
Figura 25 – Gráfico mostrando as contagens por segundo X tempo das energias que foram acompanhadas, para o aço de menor teor de cobre.....	34
Figura 26 - Gráfico mostrando o decaimento do pico de 511 KeV.....	35

Figura 27 – Atividade X profundidade para as amostras irradiadas a 9 MeV, no dia 13 de fevereiro de 2014	36
Figura 28 - Atividade X profundidade para as amostras irradiadas a 9 MeV, no dia 17 de fevereiro de 2014	36
Figura 29 - Atividade X profundidade para as amostras irradiadas a 9 MeV, no dia 20 de fevereiro de 2014	37

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composições dos aços do VPR que foram estudados.....	2
Tabela 2 - Comparação entre os diferentes tipos de radiação.....	10
Tabela 3 - Atividades dos isótopos (20MeV, imediatamente ao fim da irradiação).....	27
Tabela 4 - Contagens X Tempo decorrido para cada energia.....	28
Tabela 5 - Contagens da radiação de fundo para os picos de interesse.....	31

Lista de Siglas

D – Amostra com baixo teor de cobre

F – Amostra com alto teor de cobre

HPGe – Hyper-Pure Germanium Detector

PWR – Pressurized water reactor

VP – Vaso de Pressão

VPR – Vaso de Pressão do Reator

1 INTRODUÇÃO

O vaso de pressão do reator (VPR) de um reator a água pressurizada (PWR) é um componente do circuito primário.

Ele fornece uma barreira de pressão onde o núcleo e todos os seus componentes estão contidos, e é uma das barreiras de segurança, impedindo que os produtos de fissão se espalhem pelo ambiente. A figura 1 ilustra um vaso de pressão.

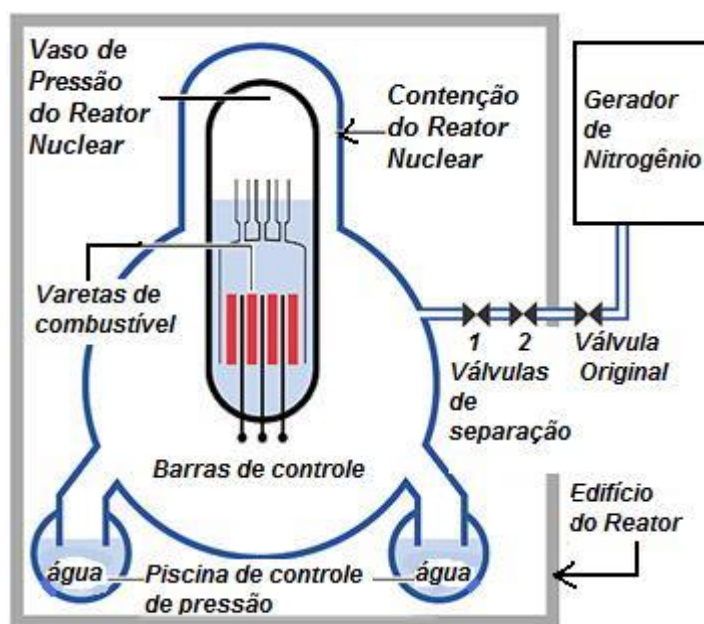


Figura 1 - Esquema de um vaso de pressão de um reator à água pressurizada

([http://2.bp.blogspot.com/-](http://2.bp.blogspot.com/-QcigtXk9RQA/TZ2EnLIOiGI/AAAAAAAAABfA/7BAIXcs9ldg/s1600/reator.jpg)

[QcigtXk9RQA/TZ2EnLIOiGI/AAAAAAAAABfA/7BAIXcs9ldg/s1600/reator.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-QcigtXk9RQA/TZ2EnLIOiGI/AAAAAAAAABfA/7BAIXcs9ldg/s1600/reator.jpg) -

acessado em 10/08/2015)

O VPR normalmente é formado de aço ferrítico ou bainítico temperado e revenido, que possui boa dureza. Os padrões mais comumente utilizados são o A533B Classe 1 ou o A508 Classe 3. Buscando criar materiais mais resistentes aos danos da radiação, a empresa Rolls Royce desenvolveu duas ligas protótipo (RR 10D e RR 15F) e solicitou ao Departamento de Metalurgia e ao Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade de Birmingham que fizesse estudos de ativação e de resistência ao dano causado pela radiação nestes aços. As composições dos aços utilizados neste experimento estão dispostas na tabela 1.

Tabela 1 – Composições dos aços do VPR que foram estudados

Densidade (g/cm ³)	Massa (Uma)	Elemento	10 D	Porcentagem Atômica	15 F	Porcentagem Atômica
7.86	55.847	Fe	93.893	93.18165475	100	93.17992854
2.62	12.011	C	0.25	1.153607028	0.2	0.92483851
2.329	28.086	Si	0.2	0.394672763	0.2	0.395507916
7.43	54.938	Mn	1.5	1.513266666	1.5	1.516468839
1.82	30.974	P	0.007	0.012525579	0.007	0.012552084
7.19	51.996	Cr	0.1	0.106592615	0.1	0.106818172
10.22	95.94	Mo	0.5	0.288846654	0.5	0.289457873
8.9	58.69	Ni	3.5	3.305224676	3.5	3.312218751
8.96	63.546	Cu	0.05	0.043609272	0.3	0.262209313

Fonte: Dr. Chris Cooper

Para realizar este experimento, foi formado um grupo de 5 alunos (comigo incluso), além dos professores Dr. Brian Connolly, Dr. Chris Copper e Dr. Martin Freer.

Um VPR recebe ao longo de sua vida aproximadamente 0,015 dpa (deslocamentos por átomo) devido à irradiação de nêutrons, e pode-se simular este dano usando radiação de prótons. Esta opção normalmente é adotada pois, para se saber com precisão o quanto uma amostra de material receberia de dano, esta teria que ser colocada dentro de um VPR, o que levaria muito tempo e é muito custoso. Outra vantagem de se utilizar prótons acelerados para simular o dano causado por nêutrons é que outras variáveis (como por exemplo, dose recebida, ativação, dureza, temperatura etc) podem ser investigadas também. Neste experimento, um ciclotron modelo MC40 foi usado para

acelerar os prótons e irradiar as amostras. Para medir a atividade das peças, um detector de Germânio Hiper-Puro (HPGe) foi usado.

Para inserção no ciclotron, as amostras foram laminadas de forma que sua área superficial fosse compatível com o feixe emitido pelo acelerador. Além disso, elas tinham espessuras diferentes, para uma possível relação entre espessura e ativação (e identificar se uma amostra mais fina fica mais ou menos ativa que a mais espessa). Para simular a atividade que as peças receberiam do núcleo, as amostras foram irradiadas em diversas energias (1, 3, 9, 20 e 30 MeV).

Quando os prótons interagem com os elementos que constituem a amostra, novos elementos se formam, e em sua maioria são altamente instáveis. Para se estabilizar, eles decaem e emitem diversas radiações, em especial a radiação gama. Esta radiação emitida é detectada pelo HPGe e sua energia medida. Como cada elemento emite um raio gama de energia específica, podemos identificar os elementos criados após a irradiação, além de acompanhar o decaimento das emissões ao longo do tempo para determinar após quanto tempo uma amostra estará segura o suficiente para ser trabalhada.

Este método requer um detector de alta resolução, para que, caso haja dois picos de energia muito próximos, eles não sejam confundidos e haja imprecisão na contagem. Por este motivo o HPGe foi escolhido.

Além do procedimento experimental, simulações computacionais foram feitas, usando dois programas: SRIM/TRIM e o código escrito por Ben Palmer (Palmer, 2010) em sua tese de mestrado, em G FORTRAN. O primeiro fornece um mapa de como a radiação se espalhará dentro da peça, e gera um arquivo chamado EXYZ. Este arquivo foi então usado como entrada para o código e como saída obteve-se uma simulação de quais elementos foram gerados após a interação do próton com a amostra, incluindo meia vida, atividade e etc.

Concomitantemente a todos os procedimentos, também sempre esteve em mente a segurança. Por isso, várias medidas dos níveis de radiação de todos os locais que continham radiação foram feitas para garantir a segurança de todos os envolvidos.

Ao final do experimento, constatou-se que os aços ficam pouco ativados, podendo ser manuseados logo após o fim da radiação. Não foram obtidos dados para analisar o dano causado ao material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de começar o experimento, pesquisou-se na literatura sobre a compatibilidade de se usar prótons para simular danos causados por nêutrons.

Was et al. (2005) em sua pesquisa concluíram que os danos causados tanto por prótons quanto por nêutrons a metais do VP eram muito similares, embora os prótons devam ter energias maiores para atingir o mesmo efeito.

Zhang et al. (2012) concluíram que as radiações de aços do VP com prótons não causavam alterações no módulo de Young da peça, mas um aumento muito grande na dureza. Resultados similares também foram obtidos quando se fazia o tratamento de temperatura.

Baseado nisto, concluiu-se que seria possível usar prótons para simular o dano causado por nêutrons nas peças de metal, bastando apenas que se fizessem as adaptações necessárias.

3 TEORIA

3.1 Interação da radiação com a matéria

3.1.1 Interação do nêutron com a matéria

Um dos princípios usados neste projeto é que o vaso de pressão estará sempre sendo irradiado durante sua vida útil, que no caso do reator nuclear se dá em sua maioria por nêutrons.

Devido à sua neutralidade eletrônica, os nêutrons passam pelas nuvens de elétrons e interagem com o núcleo elasticamente (Was, 2007). Baseado no modelo de colisão elástica, a energia de recuo T causada por um nêutron incidente pode ser obtida como uma função da energia incidente e do ângulo incidente (Was, 2007).

$$T = 2(1 + A)^{-2} * E_i * (1 - \cos[\varphi]) \quad (1)$$

Onde E_i é a energia incidente, φ o ângulo incidente e A o número atômico do átomo alvo.

A energia média de recuo pode ser expressa como:

$$T = 2(1 + A)^{-2} * E_i \quad (2)$$

3.1.2 Interação do próton com a matéria

O próton tem carga positiva e, portanto, interage com a nuvem eletrônica, além do próprio núcleo. Quando estamos considerando interações entre dois núcleons, o potencial interatômico mostrando na figura 2 deve ser utilizado (Lesar, 2013):

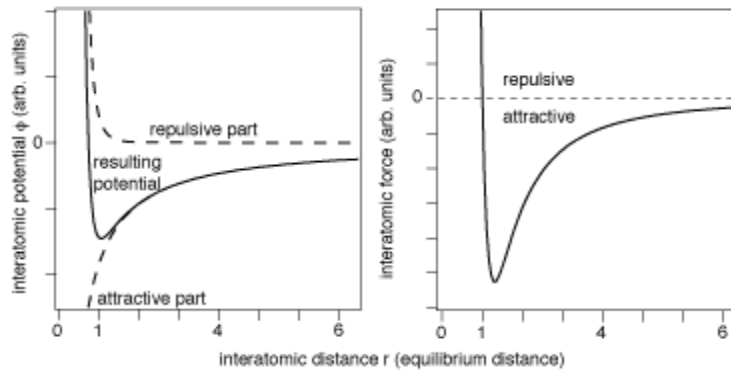


Figura 2

Distribuição do potencial interatômico pela distância(<http://users-phys.au.dk/philip/pictures/physicsfigures/physicsfigures.html> - acessado em 04/05/2014)

Legenda: *repulsive part* – parte repulsiva , *resulting potential* – potencial resultante, *attractive part* – parte atrativa , *interatomic distance* – distância interatômica , *interatomic potential* – potencial interatômico.

O espectro de energia usado neste projeto é de 1 a 30 MeV. Os modelos de interação podem ser expressos com o modelo de Coulomb, sem que alterações sejam necessárias. A energia média de recuo neste caso é descrita na equação (3) (Was, 2007).

$$\bar{T} = E_d \ln(\gamma E_i E_d) \quad (3)$$

Onde E_d é a energia de separação causada pela blindagem eletrônica e

$$\gamma = 4A(1+A)^2, \quad (4)$$

Comparando as fórmulas (1) e (3), é fácil perceber que para um mesmo valor de E_i , o nêutron produz uma energia de recuo muito maior que o próton. Portanto, para causar o mesmo dano ao material, a energia do próton tem que ser muito superior à do nêutron.

3.1.3 Interação do fóton com a matéria

Os três principais processos de interação de um fóton com a matéria são: absorção fotoelétrica; efeito Compton e produção de pares. Qual processo predominará vai

dependem do número de atômico do alvo e da energia do fóton incidente. A figura (3) mostra a relação entre esses dois fatores e o processo que ocorrerá.

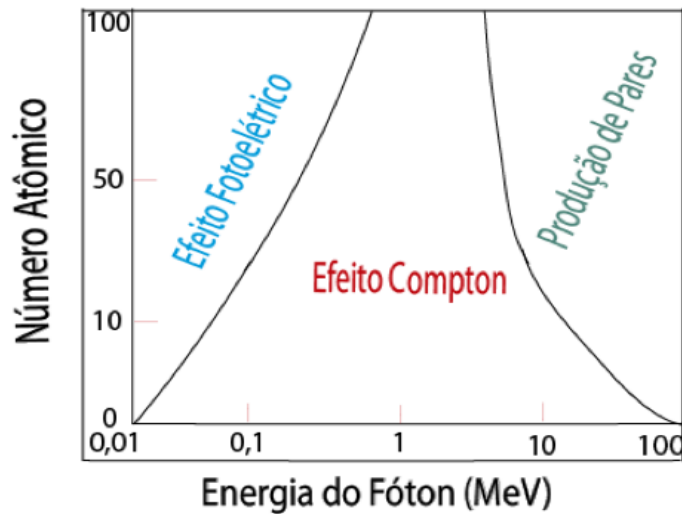


Figura 3 – As três principais interações entre fótons e a material (<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/radioteria/fig4.png> – acessado em 04/05/2014)

3.1.3.1 Absorção fotoelétrica

Quando um átomo absorve um fóton de baixa energia, como resultado ele pode emitir um elétron de uma de suas camadas. A energia desse elétron é dada pela equação 5.

$$E_e = h\nu - B.E, \quad (5)$$

onde $h\nu$ é a energia do fóton incidente, BE é a energia de ligação da camada onde o elétron ejetado estava.

Se o elétron emitido é de uma das camadas internas, os elétrons remanescentes serão re-arranjados, indo das camadas mais externas para as mais internas, e nesse processo emitirão raios X. Esses raios X também podem ser vistos no espectro como ruídos.

3.1.3.2 Espalhamento Compton

O espalhamento Compton diz respeito ao espalhamento inelástico entre o fóton e a partícula (geralmente elétron). Quando o fóton incidente de alta energia interage com o

átomo, a ligação entre o elétron e o núcleo é enfraquecida a ponto de podermos considerá-lo livre, e usarmos o modelo de espalhamento de Compton. A figura (4) ilustra este tipo de interação.

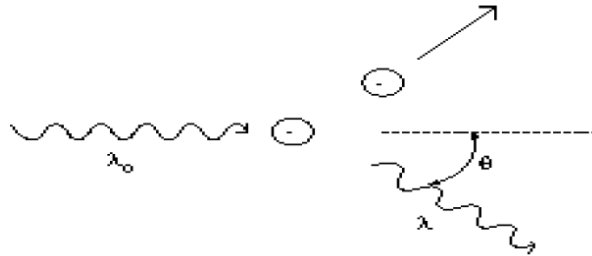


Figura 4 – Espalhamento Compton entre um fóton e um elétron

(<http://theory.uwinnipeg.ca/physics/quant/node4.html> , Figure 27.5 – acessado em 04/05/2014)

A energia do fóton espalhado é dada pela equação (6)

$$E\gamma' = E\gamma + h(1 - \cos\theta)/m_e c, \quad (6)$$

onde $E\gamma'$ é a energia final, $E\gamma$ é a energia inicial, h é a constante de Planck, θ é o ângulo que ele foi desviado da rota original, m_e é massa do elétron e c é a velocidade da luz.

A equação (6) mostra dependência entre a energia perdida pelo fóton e o ângulo do espalhamento. Quanto maior o ângulo de espalhamento, maior a perda de energia.

3.1.3.3 Produção de pares

A produção de um par elétron-pósitron se dá após raios gama de alta energia interagirem com a matéria. Enquanto o elétron sai do núcleo, o pósitron interagirá com outros elétrons e será aniquilado. Neste processo, dois fótons com energia de 511 KeV são criados. Como esses fótons saem em direções opostas, apenas um deles chega a ser detectado. Esta reação só ocorre se a energia do gama for maior que 2×511 MeV.

3.2 Análise de um espectro

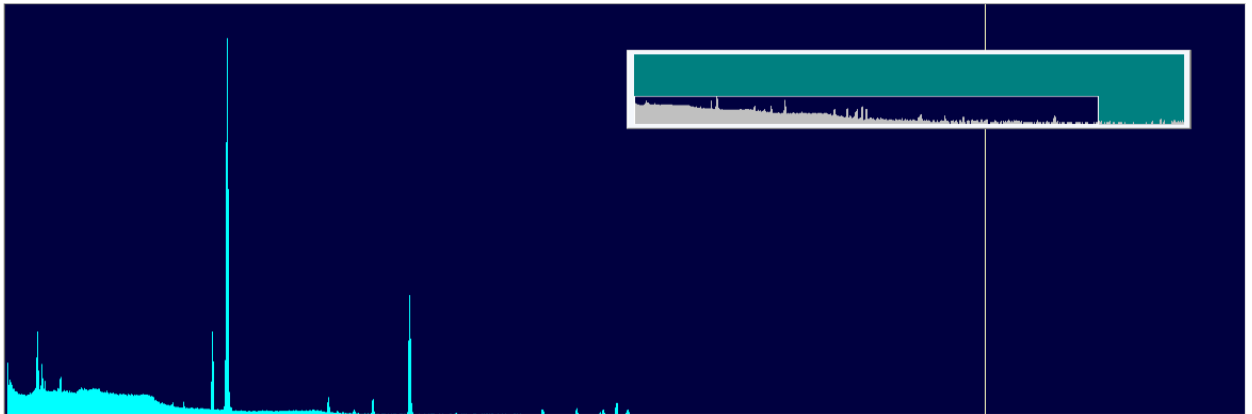


Figura 5 – Foto da tela do programa Maestro, mostrando um espectro da amostra irradiada (Baixo teor de cobre, a 30 MeV)

A maioria dos picos correspondem aos raios gama característicos que são de nosso interesse, apesar de ainda haver alguns que não serão úteis na identificação dos isótopos. Por exemplo, os picos na parte esquerda da figura 5 (com energia por volta de 100 KeV) são devido à atividade do chumbo, que foi usado na blindagem. Além disso, alguns picos com energias parecidas podem ter sido confundidos e apontados em outros picos.

O pico de 511 KeV também precisou de uma investigação mais detalhada antes de ser usado. Uma primeira explicação seria a energia que vem da produção de pares. Porém, como os raios gamas incidentes não são de energia tão altas, é muito pouco provável a ocorrência de produção de pares. Mas como ele é sempre o maior pico em todas as medidas, a melhor explicação para ele é a aniquilação de pósitrons que vêm do decaimento do β^+ , e um bom exemplo disso é o ^{56}Co , que emite partículas β^+ quando decai para ^{56}Fe (Was, 2002).

3.3 Diferenças entre radiação de nêutrons e íons

A tabela 2 resume bem as diferenças entre os diferentes tipos de íons.

Tabela 2 - Comparação entre os diferentes tipos de radiação (Little, 2006)

	Vantagens	Desvantagens
Elétrons	-Vêm de fontes relativamente simples - Altas taxas de dose (irradiação por menos tempo)	-Energia limitada a 1MeV -Sem cascatas -Requer temperaturas maiores -Não permite muito controle da temperatura da amostra

		-Formato do feixe sem perfil de intensidade uniforme -Sem transmutação
Íons Pesados	- Altas taxas de dose (irradiação por menos tempo) -Alta temperatura média -Produção de cascatas	-Penetração bastante limitada -Perfil de dano com muitos picos -Requer temperaturas maiores -Sem transmutação -Possibilidade de mudanças na composição via implantação de íon
Prótons	-Taxas de doses aceleradas (irradiação por tempo moderado) - ΔT necessário é pequeno -Penetra bastante -Perfil planar de dano de dezenas de microns	-Muito pouca ativação do alvo -Cascatas menores e bem separadas -Sem transmutação

O próximo passo é verificar a equivalência entre os dois tipos de radiação, e isto é feito observando o estado final do material, e não o caminho que a radiação percorreu. Para medir os efeitos da radiação, há diversas técnicas, como a alteração no endurecimento da matriz e segregação dos grãos da fronteira, induzidos pela radiação (Was et al, 2002).

A maior dificuldade no que se refere aos procedimentos experimentais é escolher o volume do material que pode ser testado satisfatoriamente para os dois tipos de radiação. Enquanto nêutrons têm o poder de penetração da ordem de centímetros, prótons de 1MeV só entram por volta de 10 μ m num metal.

3.4 Considerações experimentais

Apesar de perderem em penetração, os prótons têm algumas vantagens em relação aos nêutrons. Os prótons criam um perfil de deformação plano ao longo de dezenas de microns de espessura, o que significa que este vai ser profundo o suficiente para alterar as propriedades do material. A figura 6 mostra a comparação entre prótons de 3.2MeV, nêutrons de 1MeV e íons de níquel de 5MeV.

As taxas de dose dos prótons são de 100 a 1000 vezes maiores que as dos nêutrons, o que significa que é necessário um período de tempo menor para causar o mesmo dano. Isso se dá porque, além das colisões, os prótons interagem eletronicamente e causam ionização do material.

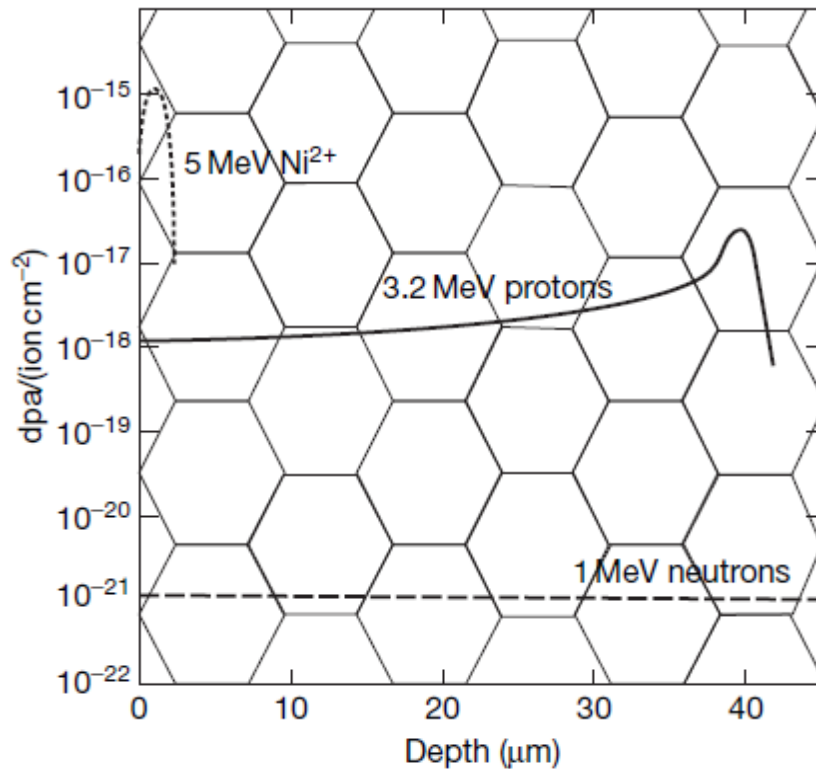


Figura 6 – Perfil de dano para nêutrons de 1MeV, prótons de 3,2 MeV e íons de Ni²⁺ a 5MeV no aço inoxidável. (Was et al, 2002)

Legenda: *depth* – profundidade , *dpa* – deslocamentos por átomo

A figura 7 resume as principais características da irradiação por prótons. Para danos maiores, a taxa de dose na superfície decai porque a seção de choque de espalhamento elástico é pequena e, portanto, o tempo necessário pra se atingir determinado nível de dose aumenta, causando um aumento no tempo de irradiação.

A transferência de energia aumenta linearmente com a energia do feixe, e é necessária a remoção de calor caso a energia do feixe aumente muito.

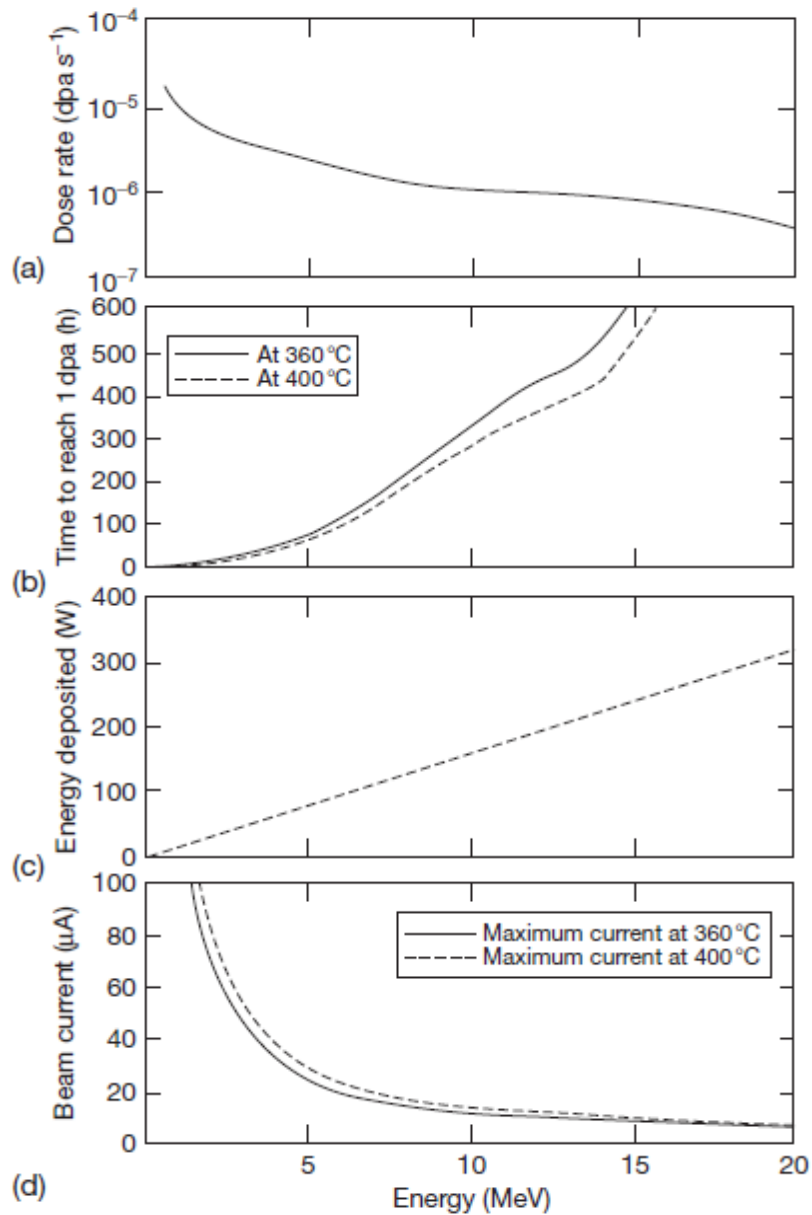


Figura 7 – Comportamento dos parâmetros do feixe-alvo como função de um feixe de prótons irradiados a 360°C (Was et al, 2002)

Legenda: *dose rate* – taxa de dose, *time to reach 1 dpa* - tempo para atingir 1 dpa ,
energy deposited – energia depositada , *beam current* – corrente do feixe , *energy* -
energia

4 APARELHAGEM

4.1 Funcionamento e noções básicas de um cíclotron

Para a geração de prótons, foi usado o cíclotron modelo MC40 do Departamento de Física da Universidade de Birmingham. O aparelho é capaz de acelerar partículas carregadas como prótons, dêuterons, hélio e etc, e a energia à qual ele será acelerado depende da massa da partícula acelerada e das configurações do cíclotron.

O funcionamento de um cíclotron pode ser descrito resumidamente como o movimento de uma partícula carregada num campo magnético perpendicular ao trajeto. Se o campo for uniforme, ele se moverá circularmente, se acelerando a cada volta.

O MC40 consiste de quatro quadrantes com 90 graus em cada cavidade. Duas cavidades diametralmente opostas (ativas – D1 e D2) são conectadas para alternar a corrente, enquanto as outras duas (inativas) são aterradas. Os íons que passam através do vão entre duas cavidades são acelerados pela diferença de potencial entre elas.

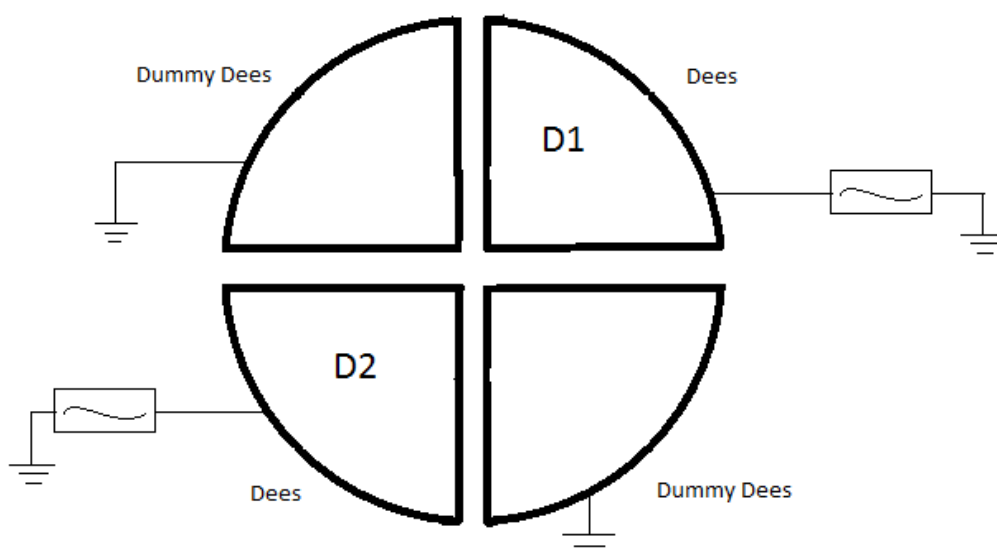


Figura 8 – Desenho feito para explicar a esquemática do cíclotron MC40

Legenda: *dees* – ativas , *dummy dees* - inativas

As diferenças de potencial são produzidas pela diferença entre o potencial das cavidades ativas e o potencial nulo dos inativos (que são aterrados). A alternância de frequência aplicada aos ativos está relacionada com a frequência orbital dos íons, e

existem dois modelos para essa frequência. O modo fundamental ($N=1$) se refere à situação na qual a frequência de alternância se iguala à frequência orbital do íon. No primeiro harmônico ($N=2$), a frequência de alternância é duas vezes à frequência orbital do íon. A figura 9 ilustra essas duas situações.

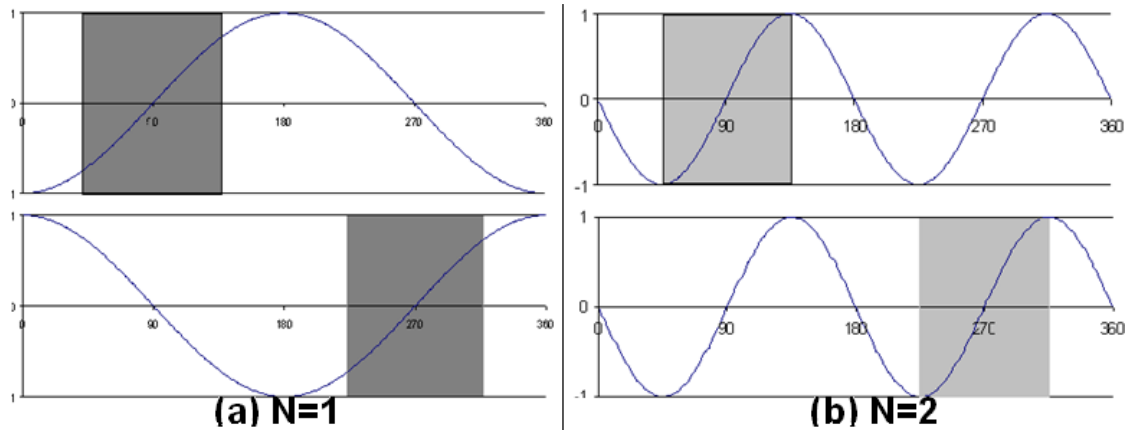


Figura 9 – Potenciais do D1 e D2 numa órbita circular

(<http://www.np.ph.bham.ac.uk/pic/cyclotron> - acessado em 04/05/2014)

Como o campo magnético máximo é de por volta de 1,8T, as energias para os diferentes íons são:

- Prótons: 11 – 38 MeV ($N=1$) e 3 – 9 MeV ($N=2$)
- Dêuterons: 5,5 – 19 MeV ($N=2$)
- 3He : 35 – 53 MeV ($N=1$) e 9 – 27 MeV ($N=2$)
- 4He : 11 – 37 MeV ($N=2$)

4.2 Detetor HPGe

Antes do detetor poder ser usado para identificar os isótopos, três fatores tiveram que ser investigados: calibração, resolução e eficiência.

4.2.1 Calibração

Para a calibração, foram usadas as fontes-teste conhecidas de ^{241}Am , ^{137}Cs e ^{60}Co . A calibração é feita ligando os picos às energias das radiações de decaimento dessas amostras. Os quatro picos mais significantes são mostrados na figura 10.

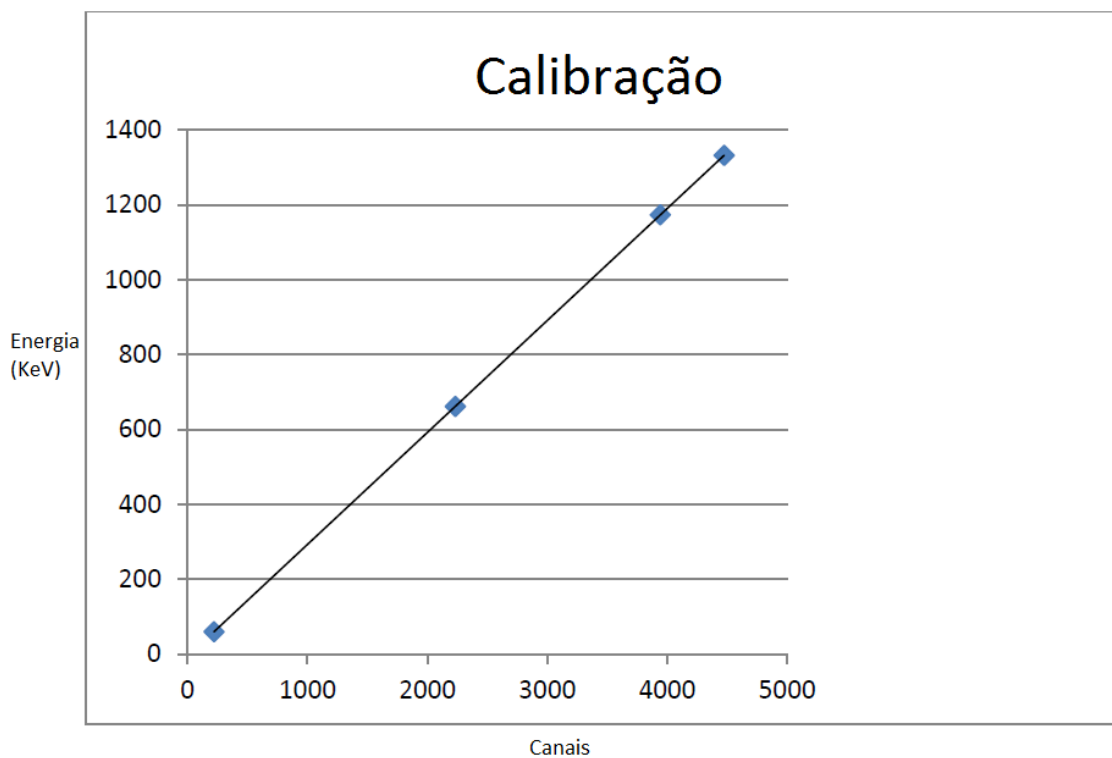


Figura 10 – Gráfico dos resultados obtidos para a calibração

4.2.2 Resolução

Para um determinado pico, a resolução é dada pela equação (7)

$$R = FWHM(E) / \text{Centróide}(E), \quad (7)$$

onde FWHM é a máxima largura à meia altura e o centróide é o centro do pico, para aquela energia.

A figura 11 mostra o gráfico da resolução para diferentes picos de energia.

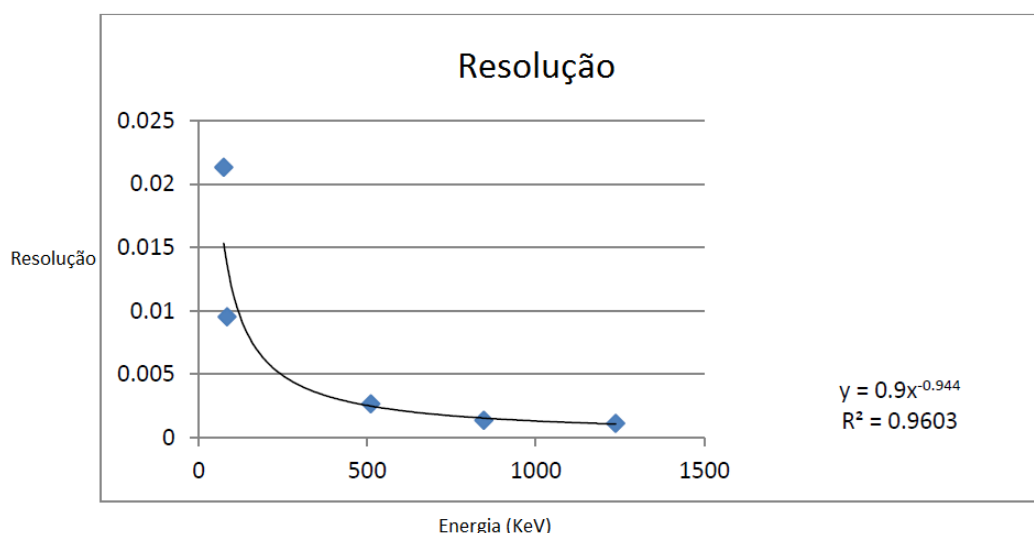


Figura 11 – Gráfico dos resultados obtidos para a resolução

A relação entre resolução e a energia equivalente pode ser útil quando se deseja verificar como o sistema de detecção funciona, pois há dois tipos principais de erros que podem ocorrer durante o processo: estática e ruído nos sistemas eletrônicos. Esses dois erros se expressam de formas diferentes no gráfico da resolução. Se o erro predominante for o de estática, ele gerará uma potência de -0,5 na fórmula usada para fazer o gráfico, enquanto o outro tipo de erro gera uma potência de -1 (Vuolo, 1996).

Os resultados obtidos mostram uma potência de -0,944, indicando que a fonte predominante de erro foi o ruído.

4.2.3 Eficiência

A eficiência de um detector para uma energia específica é calculado da seguinte forma:

$$\text{Eficiência} = \frac{\frac{N}{t}}{A \frac{\Omega}{4\pi}} \quad (8)$$

onde N representa o número de contagens daquela energia, t é o tempo que a medição durou, A é a área do gráfico e Ω é o ângulo sólido.

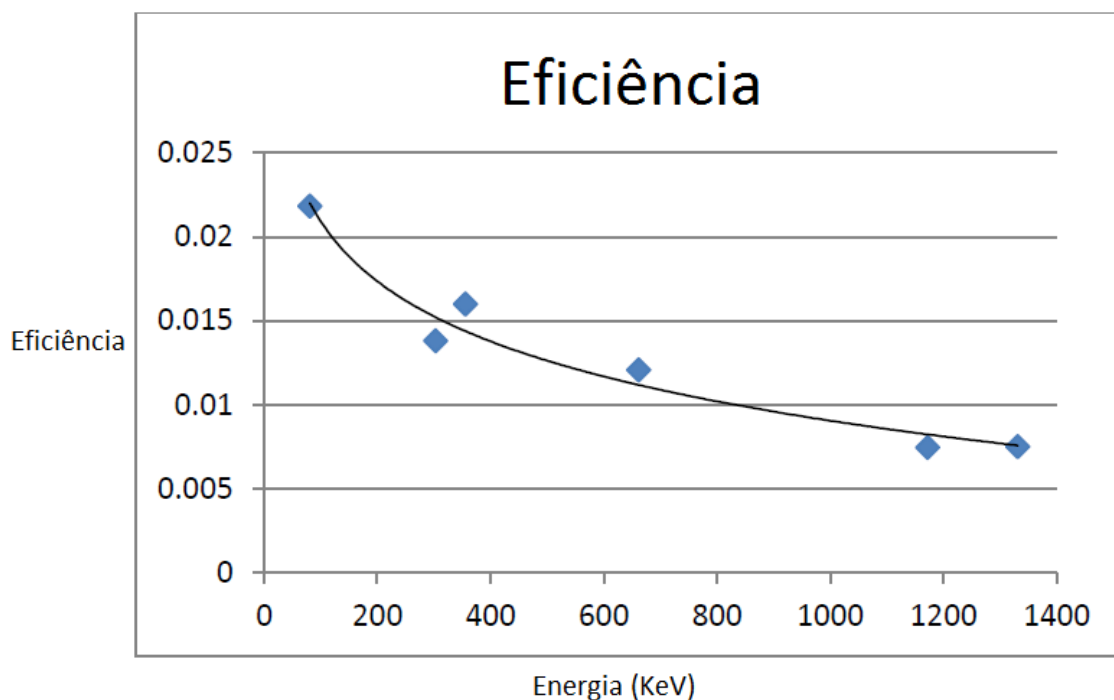


Figura 12 – Gráfico dos resultados obtidos para a eficiência

5 ANÁLISE DE SEGURANÇA

A questão da segurança sempre foi levada em consideração ao longo de todo o projeto, principalmente devido ao fato que houve contato direto com materiais irradiados.

5.1 Limites de dose

O limite de dose para trabalhadores da área nuclear no Reino Unido (local onde o experimento foi realizado) é de 50mSv/ano, ou 2,28 μ Sv/h. Para uma pessoa do público, o limite anual é de 1mSv (ICRP 60).

5.2 Prática experimental

Foram consideradas como fontes de radiação a radiação vinda das amostras e a radiação de fundo.

Antes de serem retiradas da câmara de irradiação, a atividade das amostras foi medida usando um contador Geiger Muller para garantir que estavam dentro dos limites de segurança. Esta parte foi feita pelos professores do departamento Dr. Brian Connolly e Dr. Chris Cooper, pois eles tinham mais experiência neste tipo de procedimento, e os alunos são considerados indivíduos do público.

Após a atividade ter decaído a níveis seguros, elas foram ensacadas individualmente em sacolas plásticas para facilitar o manuseio, e quando não estavam sendo usadas ficavam guardadas num cofre na sala de materiais radioativos. Quando as amostras estavam sendo guardadas ou retiradas, o mínimo de tempo possível era usado, assim como somente uma pessoa entrava na sala. Para manuseio das amostras (para retirar do plástico e colocar no detector), pinças foram usadas. Enquanto as medições eram feitas, havia placas de chumbo servindo como blindagem entre a fonte e a pessoa operando o detector.

5.3 Avaliação da dose

O principal objetivo desse cálculo foi definir os níveis de radiação aos quais seríamos exposto durante o experimento. Três diferentes métodos foram usados: simulação como o código FORTRAN, medidas com o contador Geiger Muller e cálculo da atividade com os dados obtidos.

A simulação foi usada como um guia inicial, para se ter uma idéia da ordem de grandeza dos valores envolvidos. A medição com o contador deu o real valor das taxas de dose, e serviu também como modelo de comparação para os resultados obtidos com a medição do HPGe.

Também foram medidos, da peça irradiada a 9 MeV, valores a 3 distâncias diferentes (colado à fonte, a 10 cm dela e a 1m), ao longo do tempo. Os resultados estão na Figura 13.

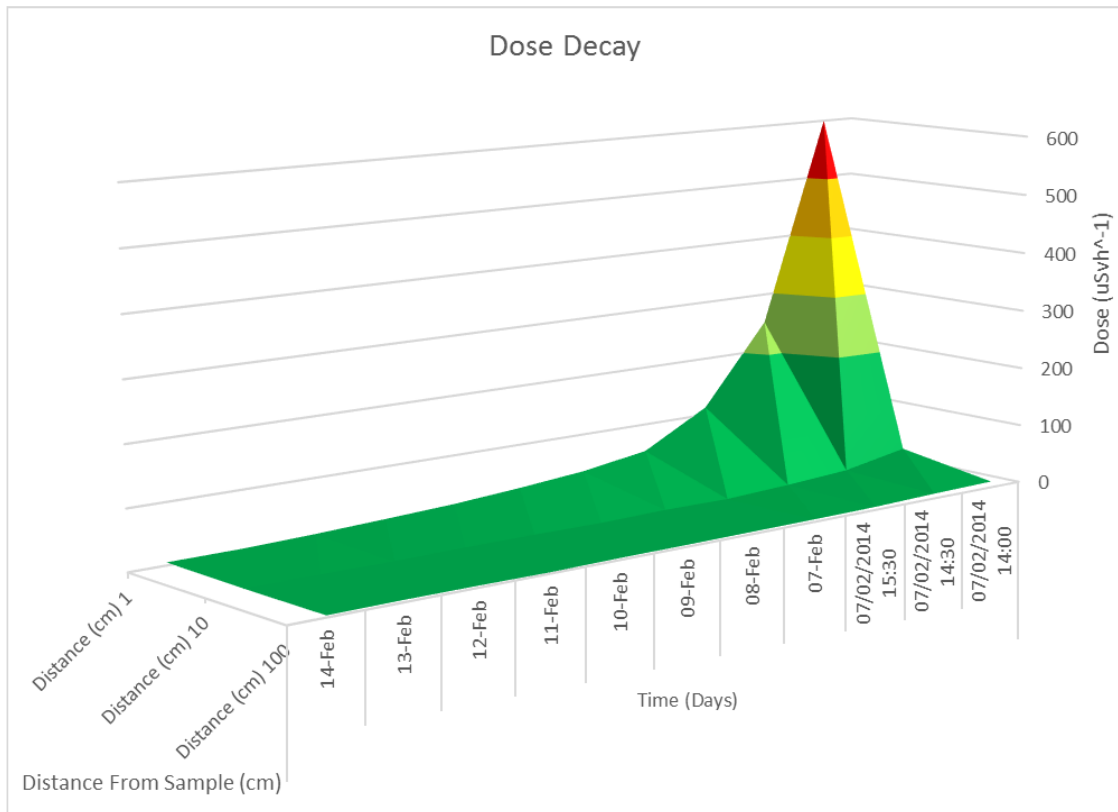


Figura 13 –Dados medidos da taxa de dose para a amostra irradiada a 9MeV

Legenda: *dose decay* – decaimento da dose , *distance* – distância , *distance from sample* – distância da amostra , *time* – tempo

5.3.1 Cálculos

Para se chegar aos valores em Sv a partir dos dados que foram obtidos (interações), algumas conversões foram feitas. Primeiramente, foi obtida a dose equivalente usando a seguinte fórmula:

$$HT = \sum Wt \cdot Dt, \quad (9)$$

onde Wt é o peso correspondente à radiação (que nosso caso – gama – é 1) e Dt é a dose absorvida.

A dose absorvida foi calculada da seguinte fórmula:

$$D = d\bar{\epsilon} dm \quad (10)$$

onde $d\bar{\epsilon}$ é a energia média contida dentro da massa dm . No experimento, a equação pode ser escrita como:

$$D = \Psi \cdot \mu_{en} \rho \quad (11)$$

onde Ψ é o fluxo de energia, e $\mu_{en} \rho$ é o coeficiente de atenuação de massa.

Esta equação pode ser derivada, e chegamos a:

$$\Psi = E \cdot A \cdot \Omega 4\pi \quad (12)$$

onde E é a energia da radiação, A é a atividade e Ω é o ângulo sólido da fonte para o corpo humano

Finalmente, juntando para todos as energias dos diferentes raios gama, temos

$$H = \sum E_i \cdot A \cdot \Omega 4\pi \cdot u_{en\rho} \quad (13)$$

Com isso, podemos relacionar os dados do detector e avaliar a taxa de dose recebida.

Por limitação de tempo e de esforço computacional, não foi feito o cálculo para todo o espectro. Alguns picos menores e insignificantes foram deixados de lado, e só os mais relevantes foram levados em consideração. Os resultados, exibidos na figura 14, mostram a atividade somente da fonte, sem o acréscimo da radiação de fundo.

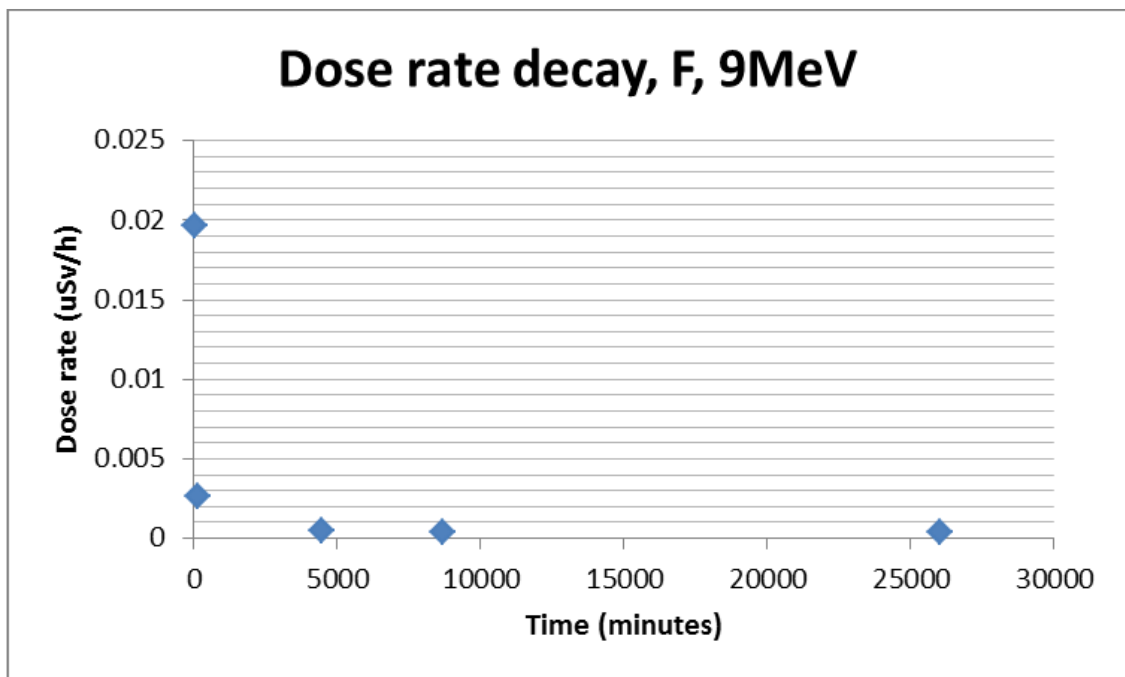


Figura 14 –Decaimento da taxa de dose para amostra de alto teor de cobre, irradiada a 9MeV

Legenda: *dose rate* – taxa de dose , *decay* – decaimento , *time* - tempo

5.3.2 Comparação e conclusão

Comparando os resultados medidos e os calculados, percebemos que a única diferença entre os dois é a radiação de fundo. Além disso, como foi previsto e conferido, as amostras decaem muito rapidamente, fazendo com que durante quase a totalidade do

experimento, os níveis de radiação ao qual fomos expostos tenha sido basicamente a radiação de fundo, que está muito abaixo dos limites de segurança.

6 ATIVAÇÃO

6.1 Modelagem

6.1.1 Visão geral do processo de modelagem

A simulação foi feita não só para se ter uma idéia dos níveis de radiação envolvidos, mas também para se ter uma idéia de quais isótopos seriam gerados.

Para fazer a simulação, foi usado um código escrito em FORTRAN por Ben Palmer, aluno de pós-graduação da Universidade de Birmingham (Palmer, 2010). O código usa como entrada os dados gerados pelo TRIM para modelar o resultado da irradiação. Os dados obtidos com este código foram comparados com os do HPGe, para que os isótopos criados fossem identificados. Além disso, o código também foi usado para prever o quanto o aumento da energia do próton iria influenciar em sua atividade inicial (assim que o processo de irradiação terminasse).

6.1.2 TRIM

O TRIM é um programa que simula vários aspectos da interação da radiação com um alvo. Ele funciona usando algoritmos estatísticos (como simulação de Monte Carlo) para calcular as interações quantum-mecânicas entre o átomo e o íon, e faz isso diversas vezes para ter uma distribuição estatisticamente relevante dos prováveis resultados.

No caso deste experimento, a composição do material utilizado no estudo (alvo) foi simplificado, pois foi constatado que o código em FORTRAN não se comportava muito bem quando muitos elementos de baixa concentração eram usados. A composição utilizada para simulação foi: 95% Fe, 1,5% Mn e 3,5% Ni. Além disso, como será mostrado mais adiante, esta simplificação não invalidou a simulação.

A figura 15 apresenta a tela do programa TRIM usado para a obtenção do arquivo EXYZ, que mostra a distribuição da energia de uma partícula e sua posição

dentro do alvo. Ele acompanha a partícula até que ela tenha apenas 10eV de energia. Os dados do arquivo EXYZ foram plotados no gráfico representado na figura 16.

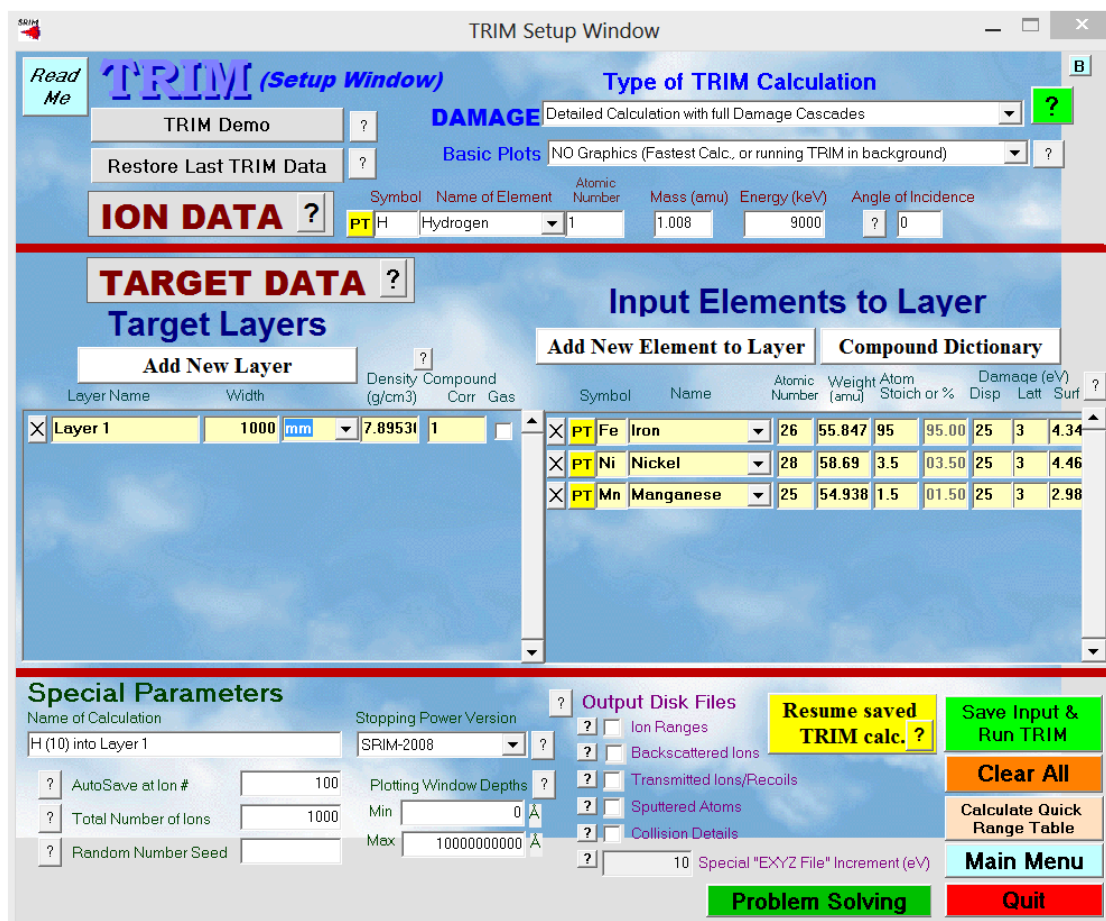


Figura 15 – Tela do TRIM, pronto para a simulação

Uma restrição do TRIM é que a menor energia que se pode colocar para o próton é de 7MeV, pois abaixo disso os prótons não seriam capazes de romper a barreira de Coulomb do núcleo. Portanto só puderam ser simuladas as interações com os prótons de 9, 20 e 30 MeV.

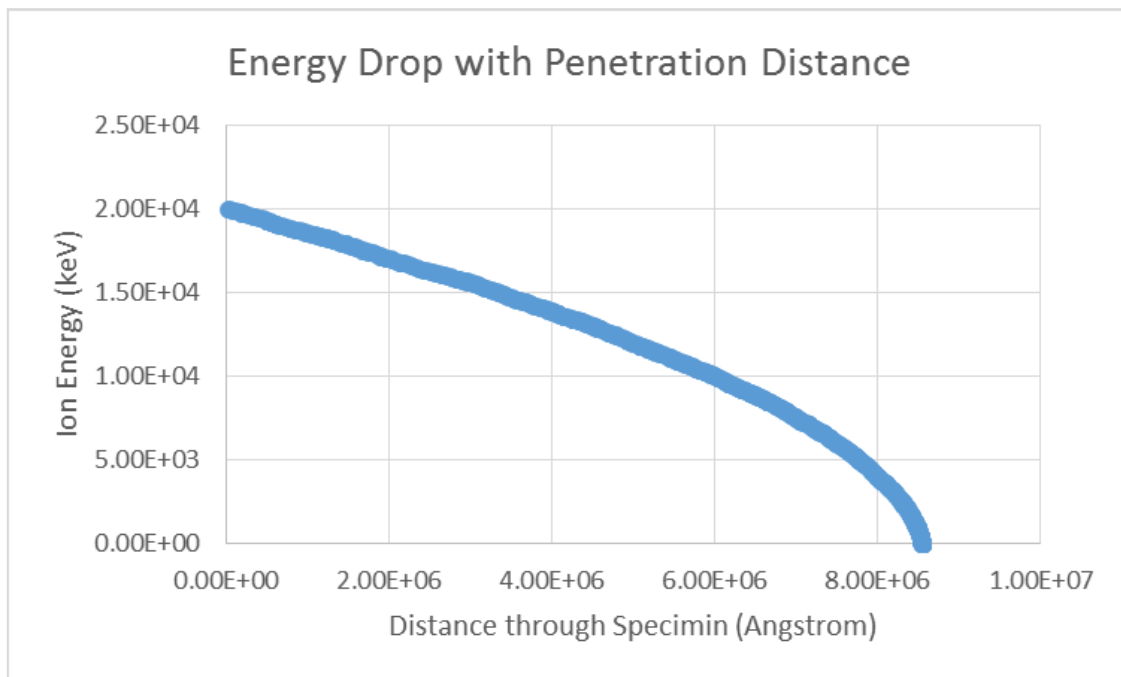


Figura 16 – Evolução da energia do próton conforme ele adentra o alvo

Legenda: *energy drop with penetration distance* – diminuição da energia com a distância de penetração , *ion energy* – energia do íon , *distance through specimin* – distância dentro do espécime

Esta simulação foi repetida 1000 vezes, para cada energia, e então os valores foram colocados no código em FORTRAN.

6.1.2 Código em Fortran

O código foi usado para calcular a atividade dos isótopos produzidos, o espectro gama resultante e a atividade total da amostra. A descrição de como o código funciona mais detalhadamente é descrita em Palmer (2010).

A figura 17 mostra a distribuição atividade x energia do próton x profundidade da penetração. A figura 18 mostra o decaimento da atividade com o tempo, que como se pode facilmente perceber, é bem acelerada.

A figura 19 mostra a comparação entre os dados do FORTRAN e do TRIM.

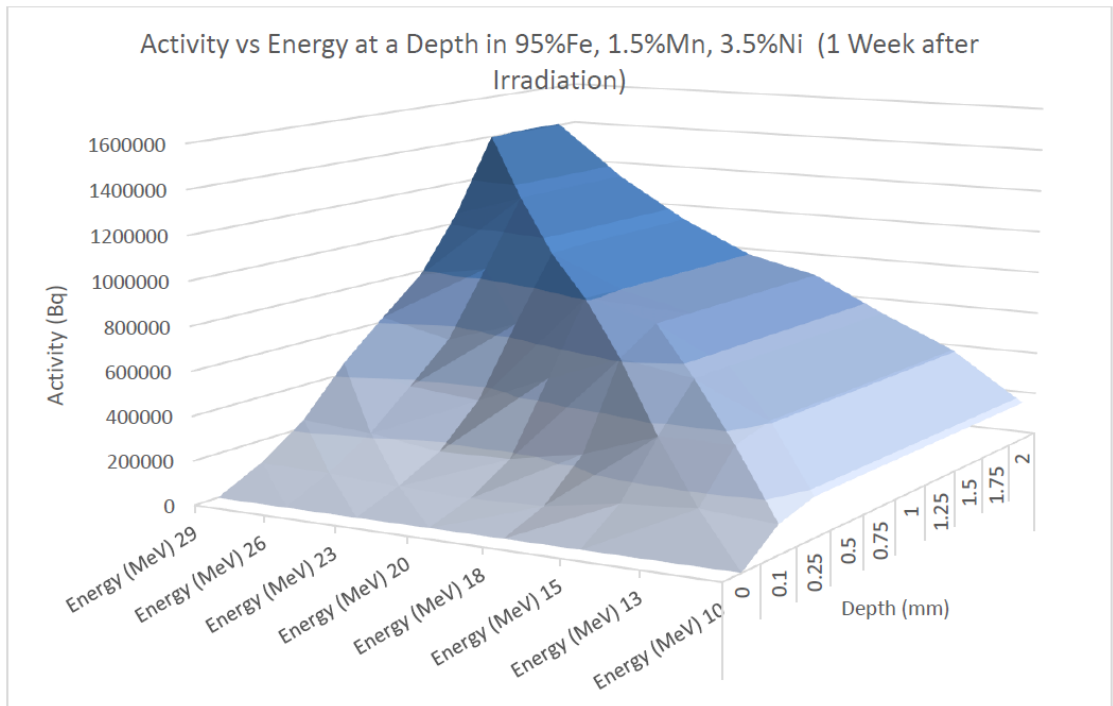


Figura 17 –Atividade X profundidade após 1 semana da irradiação

Legenda: *activity vs energy at depth* – atividade X energia contra profundidade , *1 week after radiation* – uma semana após a irradiação , *activity* – atividade , *energy* – energia , *depth* - profundidade

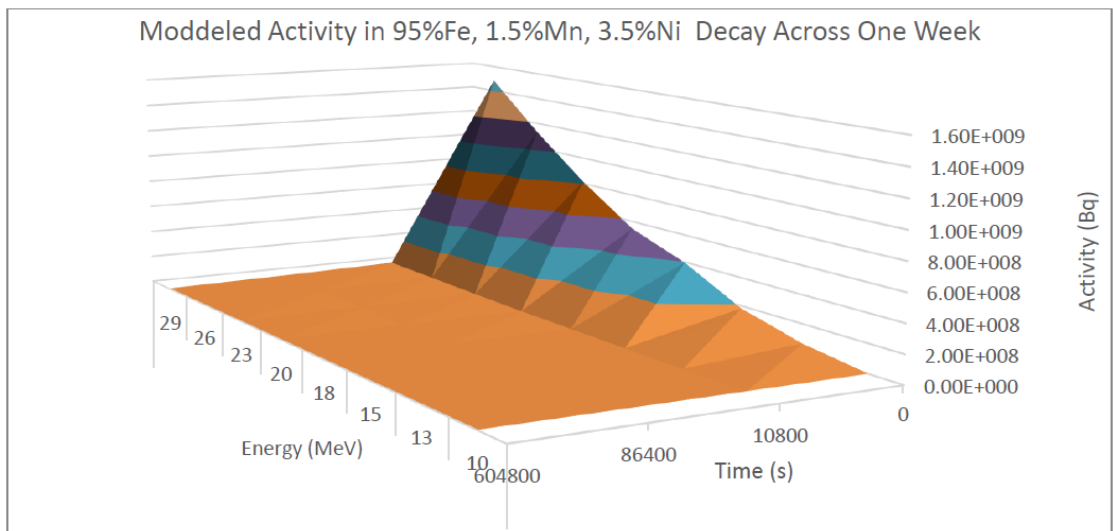


Figura 18 – Atividade simulada ao longo de uma semana usando a atividade à maior profundidade

Legenda: *modeled* - modelada, *decay across one week* – decaimento ao longo da semana, *activity* – atividade , *energy* – energia , *depth* - profundidade

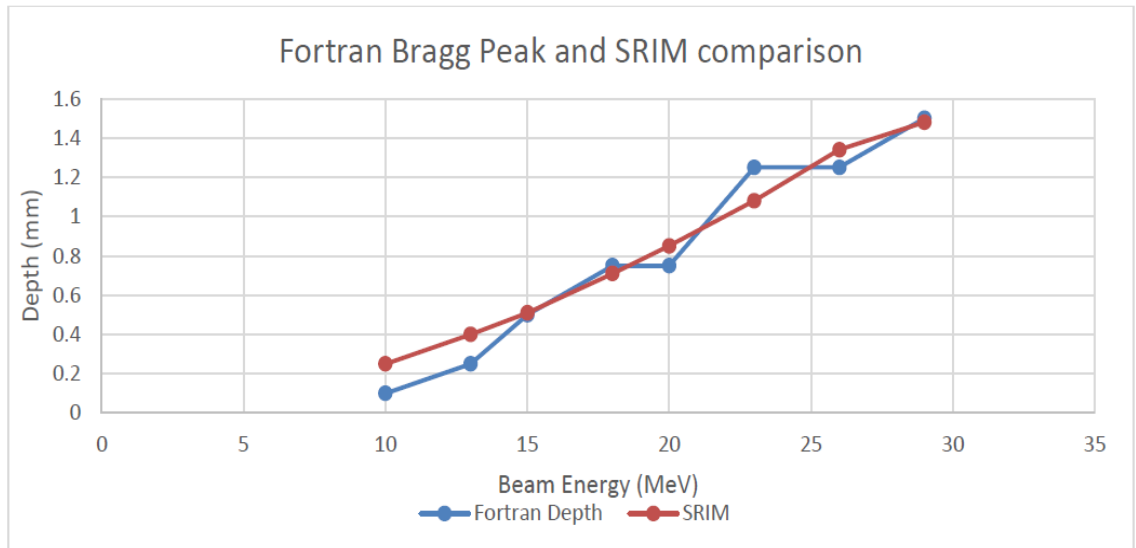


Figura 19 – Comparação entre o pico de Bragg do FORTRAN e do SRIM

Legenda: *comparasion* – comparação , *energy* – energia , *depth* – profundidade , *beam* - feixe

A relação direta entre aumento de energia e aumento da profundidade era esperada, pois quanto maior a energia colocada no próton, mais vezes ele pode interagir perdendo energia e continuar avançando.

Também foi feito um gráfico do aumento da atividade inicial com o aumento da energia inicial do próton (figura 20).

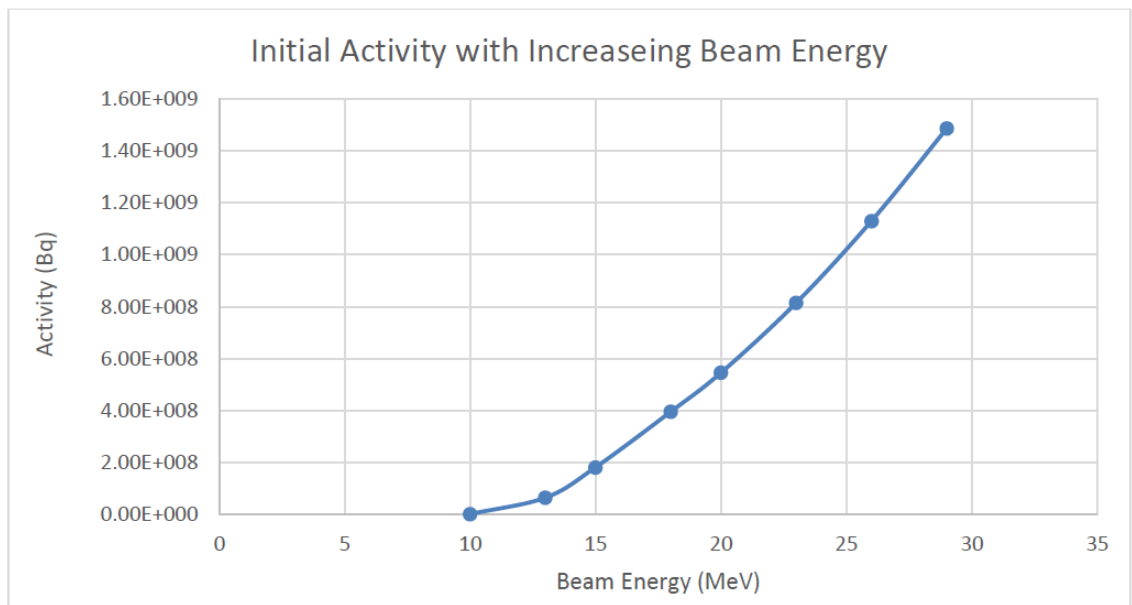


Figura 20 –Atividade inicial X energia do feixe

Legenda: *activity* – atividade , *energy* – energia , *beam* – feixe , *initial activity with increaseing beam energy* – atividade inicial com o aumento da energia do feixe

A maior importância do código foi gerar uma tabela com a previsão de quais isótopos surgiriam, para que fosse encontrados posteriormente com os dados do HPGe. A tabela 3 mostra os mais ativos, para a energia de 20MeV, ao fim da irradiação.

Tabela 3 - Atividades dos isótopos (20MeV, imediatamente ao fim da irradiação)

Elemento	Z	A	Atividade (Bq)
Co	27	55	0.43E+07
Mn	25	51	0.68E+06
Co	27	56	0.40E+06
Ni	28	57	0.20E+06
Cu	29	61	0.15E+06
Cu	29	60	0.88E+05

Com essa previsão, as energias dos decaimentos mais frequentes foram pesquisadas e então foram comparadas às energias dos maiores picos detectados com o HPGe. Foram confirmadas a presença dos seguinte isótopos: ^{55}Co , ^{56}Co , ^{51}Mn e ^{57}Ni .

Para encontrar os isótopos, o procedimento a seguir foi adotado.

Primeiro, usam-se as contagens de suas energias características de decaimento (por exemplo, no ^{55}Co são 477KeV, 931KeV e 1408KeV). Os dados para o ^{55}Co são apresentados no gráfico da figura 21 e expostos na tabela 4, que foram usados para estimar sua meia vida e verificar se ela é compatível com a meia-vida real do elemento.

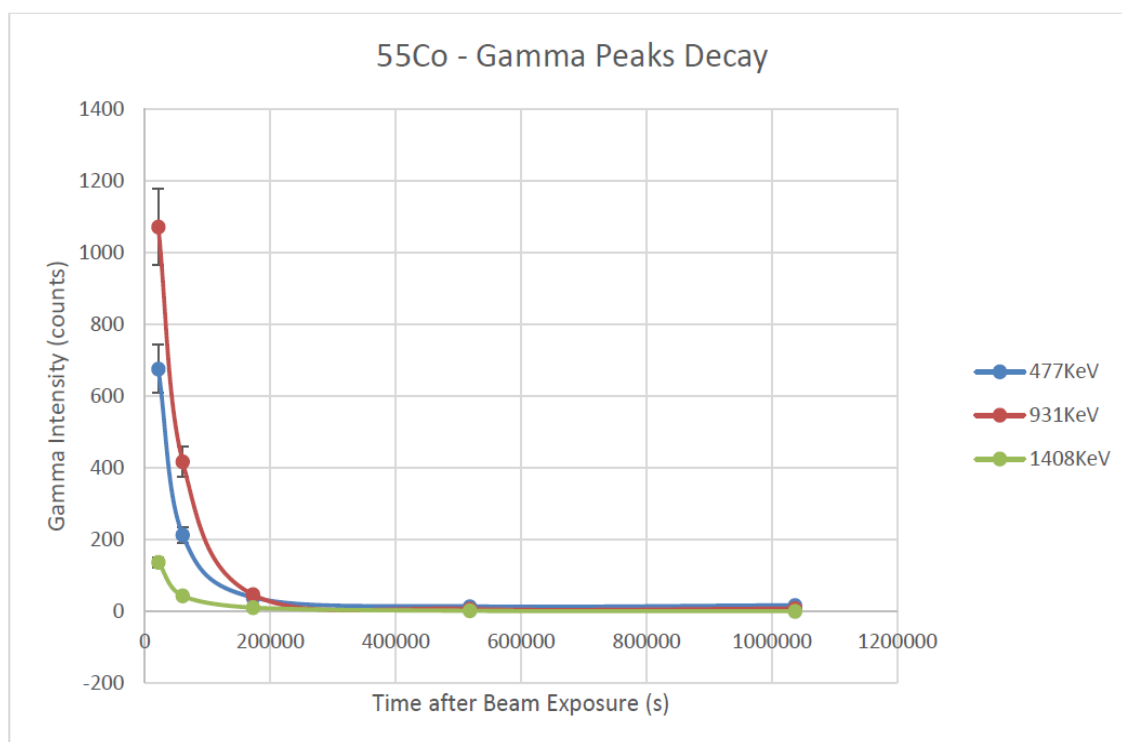


Figura 21 – Decaimento das energias do ⁵⁵Co

Legenda: *gamma peaks decay* – decaimento dos raios gama , *gamma intensity* – intensidade dos gamas , *time after beam exposure* – tempo após exposição ao feixe

Tabela 4 – Contagens X Tempo decorrido para cada energia

	477KeV	931KeV	1408KeV
21600 s	675	1071	136
60660 s	212	416	43
172800 s	38	46	10
518400 s	13	6	1
1036800 s	16	7	0
1900800 s	16	6	0

Essa estimativa foi feita do modo tradicional, verificando o tempo que se passava até que as contagens se reduzissem pela metade. A meia vida calculada para o ⁵⁵Co foi de 17,5 horas, e sua meia vida real é de 25 horas. Apesar de os valores serem aparentemente muito diferentes, considerando todas as aproximações envolvidas (como o espaçamento entre as medidas, e as próprias incertezas das medidas, além do fato do ⁵⁵Co também decair por β^+ , que não é detectado), eles são compatíveis, pois têm a mesma ordem de grandeza.

O mesmo procedimento foi feito com os outros isótopos encontrados.

Em relação aos isótopos que não foram encontrados, há três principais razões para isto. Primeiramente, é que alguns foram produzidos em quantidades muito

pequenas, a ponto de não serem detectados, ou serem confundidos com a radiação de fundo. A segunda é que algumas meias-vidas são tão pequenas (da ordem de segundos, ou até menos), que quando a amostra foi repassada para nós para medida da atividade, elas já teriam decaído até estarem no nível da radiação de fundo. Por último, como muitos isótopos decaem da mesma maneira, muitos emitem radiações gama de energias iguais ou muito próximas, fazendo com que sejam mascarados, uma vez que é impossível diferenciar raios gama de mesma energia para descobrir de onde vieram. Um exemplo disso é o ^{51}Mn , cujo raio gama mais frequente é o de 511KeV (que também é o mais frequente de outros isótopos), porém, os outros são de frequência muito baixa para detectarmos, e portanto não podemos confirmar a sua presença.

6.2 Resultados e Análise

6.2.1 Procedimentos de Irradiação

As energias usadas para ativar as amostras e as respectivas configurações do cíclotron foram:

9.4MeV

A irradiação foi feita no dia 7 de fevereiro de 2014, começando às 14:20 e terminando às 15:25. Foi aplicada uma corrente de $3\mu\text{A}$ para depositar uma carga total de 1,2mC por um colimador de 30x10 mm, e ativar a amostra a 9 MeV.

21MeV

A irradiação foi feita no dia 13 de fevereiro de 2014, começando às 14:45 e terminando às 15:40. Foi aplicada uma corrente de $3\mu\text{A}$ para depositar uma carga total de 0,6mC por um colimador de 10x5 mm, e ativar a amostra a 20 MeV.

3.7MeV

A irradiação foi feita no dia 14 de fevereiro de 2014, começando às 15:00 e terminando às 16:20. Foi aplicada uma corrente de $0,5\mu\text{A}$ para depositar uma carga total de 0,6mC por um colimador de 10x5 mm, e ativar a amostra a 3 MeV.

2.9MeV (degradadores foram utilizados para ativar a amostra a 1MeV)

A irradiação foi feita no dia 18 de fevereiro de 2014, começando às 13:00 e terminando às 14:00. Foi aplicada uma corrente de $2\mu\text{A}$ para depositar uma carga total de 0,6mC por um colimador de 10x5 mm, e ativar a amostra a 1 MeV.

29MeV

A irradiação foi feita no dia 25 de fevereiro de 2014, começando às 15:25 e terminando às 16:30. Foi aplicada uma corrente de $2\mu\text{A}$ para depositar uma carga total de $0,6\text{mC}$ por um colimador de $10\times 5\text{ mm}$, e ativar a amostra a aproximadamente 28 MeV .

A diferença entre a energia de entrada no cíclotron aquela à qual a amostra fica ativada pode ser explicada pelas perdas que o próton sofre entre o momento que sai do acelerador e chega na amostra. Sabendo disto, o operador estima essa perda e a compensa, aumentando a energia inicial.

No caso da ativação a 1MeV , como $2,9\text{MeV}$ é a menor energia a que o cíclotron consegue acelerar, barreiras (degradantes) foram colocadas no caminho até a amostra, para que se chegasse à energia requerida.

É importante ressaltar que toda a operação do cíclotron foi feita pelos físicos do departamento, e as amostras só foram repassadas para a medição após seu nível de atividade estar abaixo dos limites de segurança. Além disso, as amostras ativadas a 30MeV estiveram durante todo o procedimento de medida com atividades acima dos limites para o público, e por causa disso as medidas foram feitas pelo Dr. Brian Connolly.

6.2.2 Medindo as amostras

Uma vez que o HPGe foi devidamente calibrado e suas características conhecidas, o procedimento pôde começar. Foram feitas várias medidas entre os dias 7 de fevereiro e 5 de março de 2014. As tabelas com todas as medidas feitas estão em anexo.

O tempo que cada medida levou foi alternado entre 300 e 600 segundos, dependendo do quão ativas as amostras estavam. Uma vez que a medida era concluída, os dados eram analisados no Maestro (software usado para leitura dos dados do detector – figura 22), para que as informações de cada pico pudessem ser extraídas. A radiação de fundo foi medida por 1200 segundos, para que ela pudesse ser descontada durante a análise.

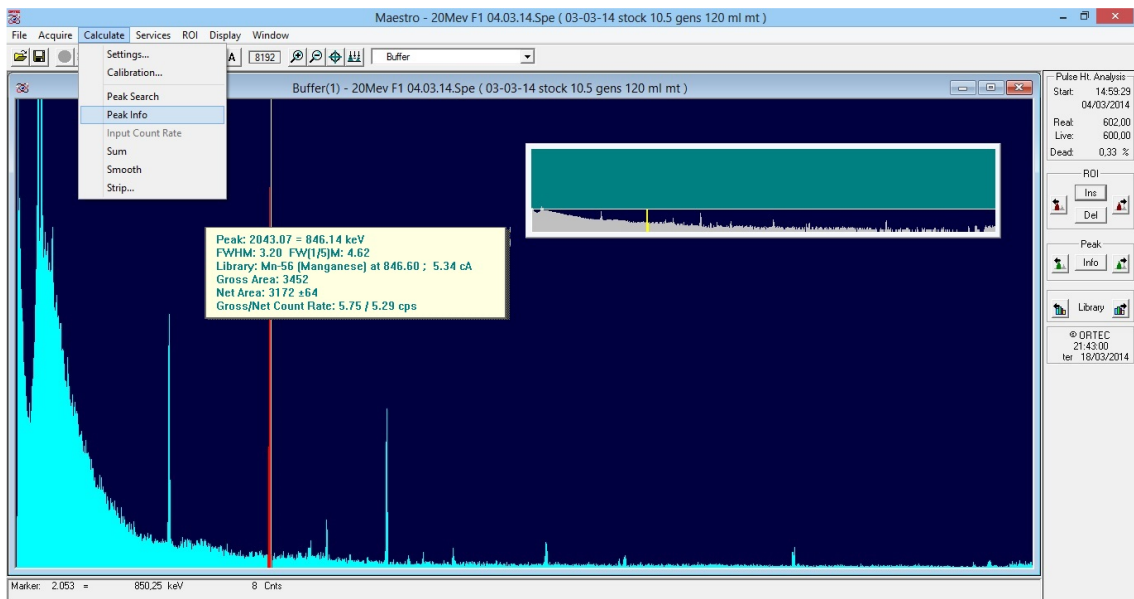


Figura 22 – Vista geral do Maestro

6.2.3 Resultados

Como o principal objetivo era identificar as taxas de decaimento das amostras, as contagens de cada pico foram seguidas ao longo do tempo. Para isto, usamos como parâmetro de corte que cada pico tivesse no mínimo 100 contagens e não mais que 10% de erro para essas contagens. Tais parâmetros foram adotados para se ter certeza de que os picos vinham das amostras e não eram provenientes de fundo ou ruído. Além disso, como alguns picos decaíam muito rápido e desapareciam de uma medida para outra, só foram analisados os decaimentos dos picos que duraram até a última medida.

Por ter sido a primeira amostra a ser irradiada e por ter ficado ativa até o último dia de medidas, vamos discutir aqui os resultados da amostra de 20MeV. Os resultados e análise de todas as outras amostras podem ser encontrados em anexo.

6.2.3.1 Conclusões preliminares

Primeiramente, analisando separadamente os dados da radiação de fundo, percebemos que os picos de 74 e 85 KeV pertenciam somente à radiação de fundo. Chegou-se a essa conclusão porque esses picos não decaíam com o tempo, além de não aumentarem suas contagens durante a mediação de nenhuma amostra. Também foi aferido que nenhum dos picos da radiação (tabela 5) de fundo coincidia com os das amostras.

Tabela 5 – Contagens da radiação de fundo para os picos de interesse.

14/mar	13:36:01	1200s live
Energia	Contagens	Contagens/s
74,83	6488	5,406667
85	3953	3,294167
510,44	222	0,185
847,56	5	0,004167
1040,01	9	0,0075
1238,99	21	0,0175
1764,46	18	0,015
2614,36	30	0,025

Ao longo da análise, percebeu-se que ao dobrar o tempo da medida (de 300 para 600 segundos), não se obtinha o dobro de contagens, e algumas medidas adicionais da radiação de fundo foram feitas para confirmar isso. Este fato deu origem a alguns problemas que serão abordados mais à frente.

Agora serão discutidos os resultados das três amostras irradiadas a 20MeV.

6.2.3.2 Alto teor de cobre (RR F15)

Os resultados completos estão em anexo. Os picos que foram acompanhados ao longo do tempo foram os de 511, 846, 1037, 1238, 1771 e 2598 KeV. Seus respectivos decaimentos ao longo do tempo foram representados nas figuras 23 e 24.

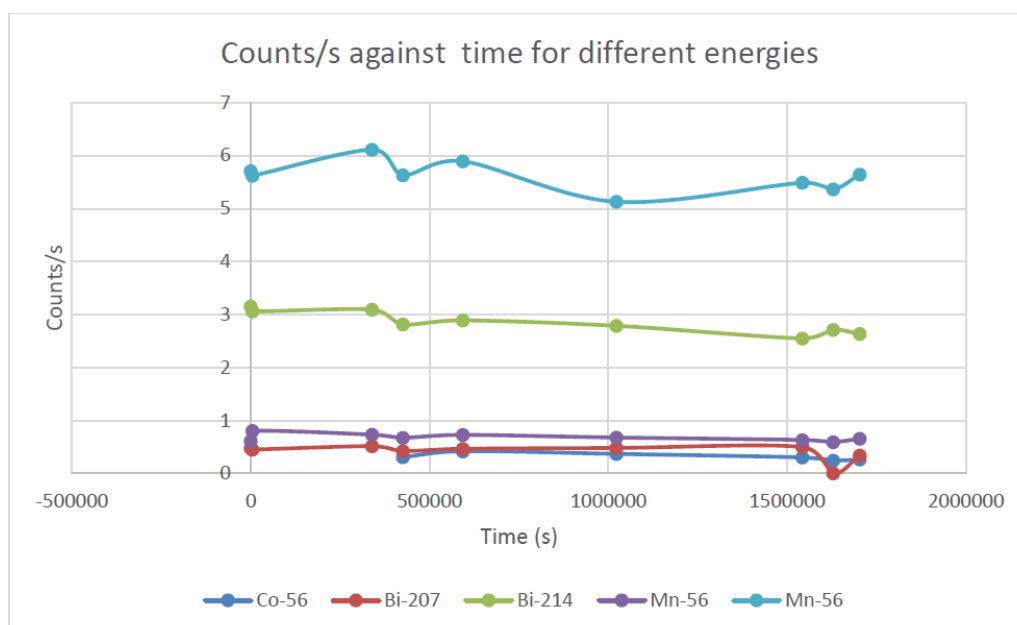


Figura 23 – Gráfico mostrando as contagens por segundo X tempo para diversas

Legenda: *counts/s against time for different energies* – contagens por Segundo X tempo para diferentes energias , *counts/s* – contagens/s , *time* - tempo

energias de raio gama para a amostra com alto teor de cobre. Obs: as legendas das faixas de energia foram nomeadas de acordo com as previsões feitas pelo Maestro, e não necessariamente são os isótopos de fato produzidos. As energias correspondentes a cada uma podem ser encontradas em anexo.

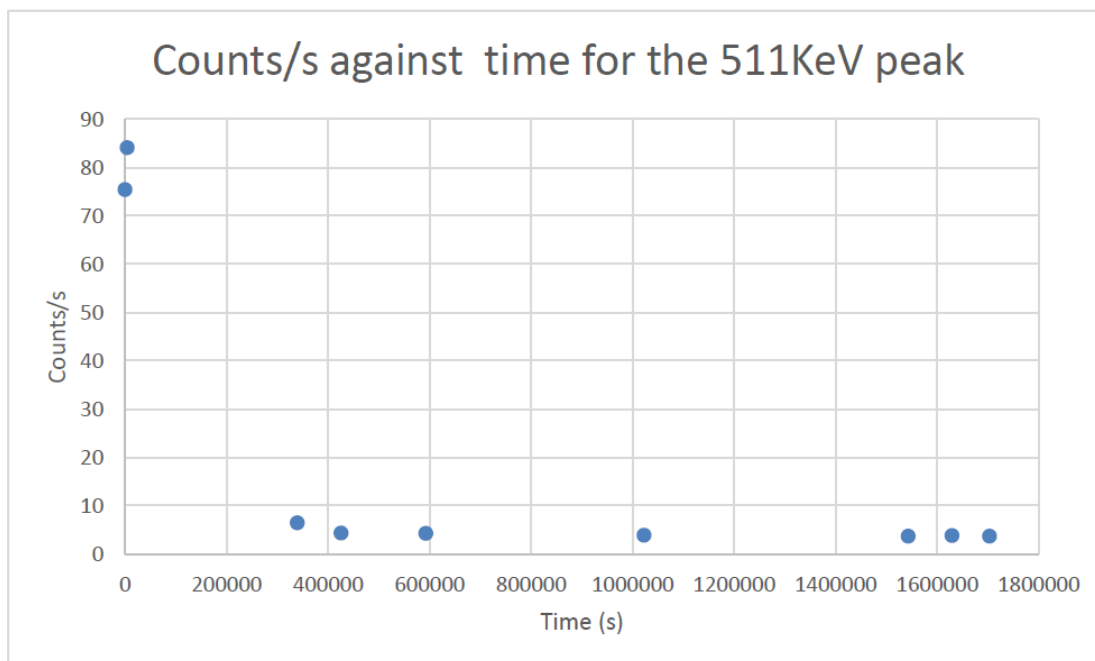


Figura 24 – Gráfico mostrando o decaimento do pico de 511 KeV

Legenda: *counts/s against time for the 511 KeV peak* – contagens por Segundo X tempo para a energia de 511 KeV , *counts/s* – contagens/s , *time* - tempo

O pico de 511 KeV foi mostrado num gráfico separado para deixá-los mais claros, pois sua escala é muito maior que a dos outros.

A primeira coisa que pode ser notada é que os gráficos não se assemelham ao de um decaimento exponencial, como são os gráficos de decaimento. O motivo para isso é que o principal elemento produzido (^{56}Co), tem meia-vida de 77 dias, e como a atividade foi medida ao longo de 16 dias, ele decaiu muito pouco (nem $\frac{1}{4}$ de sua meia vida se passou). Isso faz com que a diferença de atividade ao longo do tempo tenha sido pequena.

Além disso, houve uma flutuação nos dados (aparentemente o número de contagens não cai continuamente ao longo do tempo). Isso acontece pela diferença nos tempo de medida, pois como foi apontado anteriormente, o dobro do tempo de medida

não resulta no dobro de contagens, alterando portanto a proporção contagens por segundos, utilizada para fazer os gráficos.

Também tem que se ressaltar que conforme o passar do tempo e a atividade reduzia, o erro intrínseco da medida (da eletrônica e etc) e as diferenças de como os picos eram selecionados no Maestro se tornavam cada vez mais significativas e aumentavam ainda mais os erros associados às contagens, fazendo com que o gráfico não apresentasse uma queda constante. Tais elementos eram ainda mais impactantes quanto mais lento o decaimento.

A última coisa a se ressaltar é que o pico de 1770 KeV aparece contendo 0 contagens, e isso se deu porque ele teve menos de 100 contagens e, portanto, foi descartado.

O único pico que não está relacionado com o decaimento dos isótopos produzidos é o de 511KeV, que vem da desintegração de um pósitron com um elétron, como foi explicado anteriormente.

Para algumas amostras, a estimativa da taxa de decaimento não pôde ser feita, por causa dos problemas citados anteriormente. Em alguns casos, a atividade medida ao final era maior que a inicial.

Como principal objetivo do experimento, o total do equivalente em dose emitida foi calculado. Para se calcular isso, primeiro teve-se que obter a atividade real da amostra (em Bq/s), o que foi feito multiplicando a atividade medida por 1/eficiência. Após isso, este número foi multiplicado pela energia de cada pico para se obter um número em J/s. Então, a atividade foi dividida por 70Kg (o peso médio de um adulto) para se descobrir a dose absorvida, e como o fator de peso do raio gama é 1, o equivalente em dose em Sv/s é o mesmo.

Os resultados são mostrados na tabela 6:

Table 6-Equivalente em dose para cada dia de medida

Data	13/fev	17/fev	18/fev	20/fev	25/fev	03/mar	04/mar	05/mar
Dose μ Sv/h	0,02819093	0,00672	0,005938	0,00622	0,005657	0,005562	0,005242	0,005542

6.2.3.3 Baixo teor de cobre (RR D10)

Os resultados em sua totalidade estão em anexo.

Como foi previsto, a diferença na quantidade de cobre não alteraria de forma significativa a ativação da amostra. Portanto, os mesmo picos e suas evoluções no tempo (mostrados nas figuras 25 e 26), curvas de decaimento e os problemas encontrados foram os mesmos.

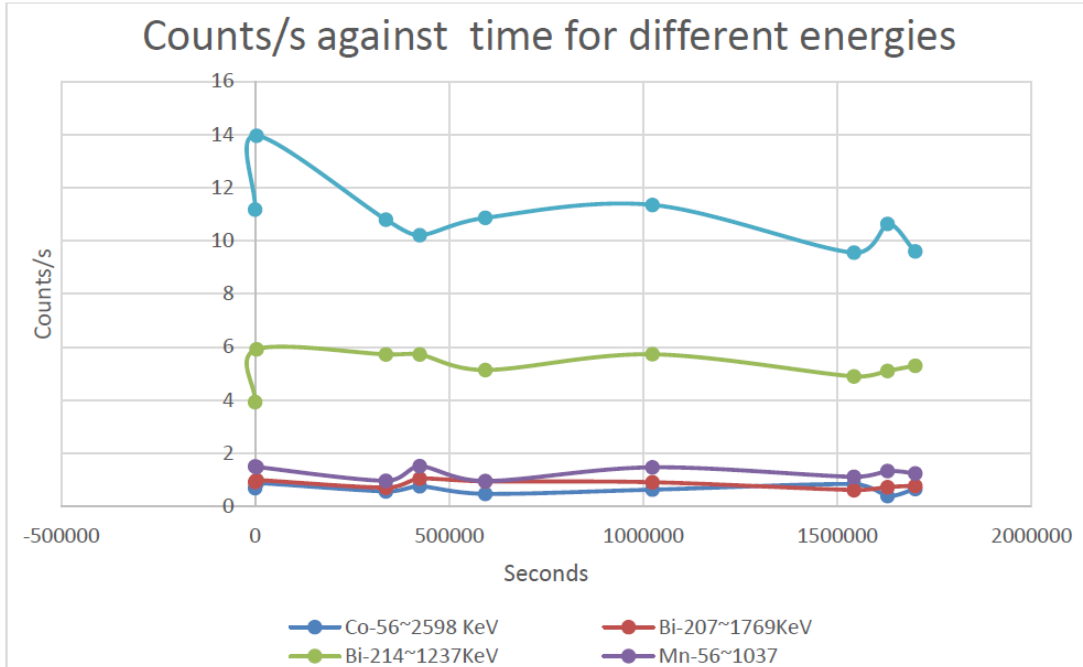


Figura 25 – Gráfico mostrando as contagens por segundo X tempo das energias que foram acompanhadas, para o aço de menor teor de cobre.

Legenda: *counts/s against time for different energies* – contagens por Segundo X tempo para diferentes energias , *counts/s* – contagens/s , *time* - tempo

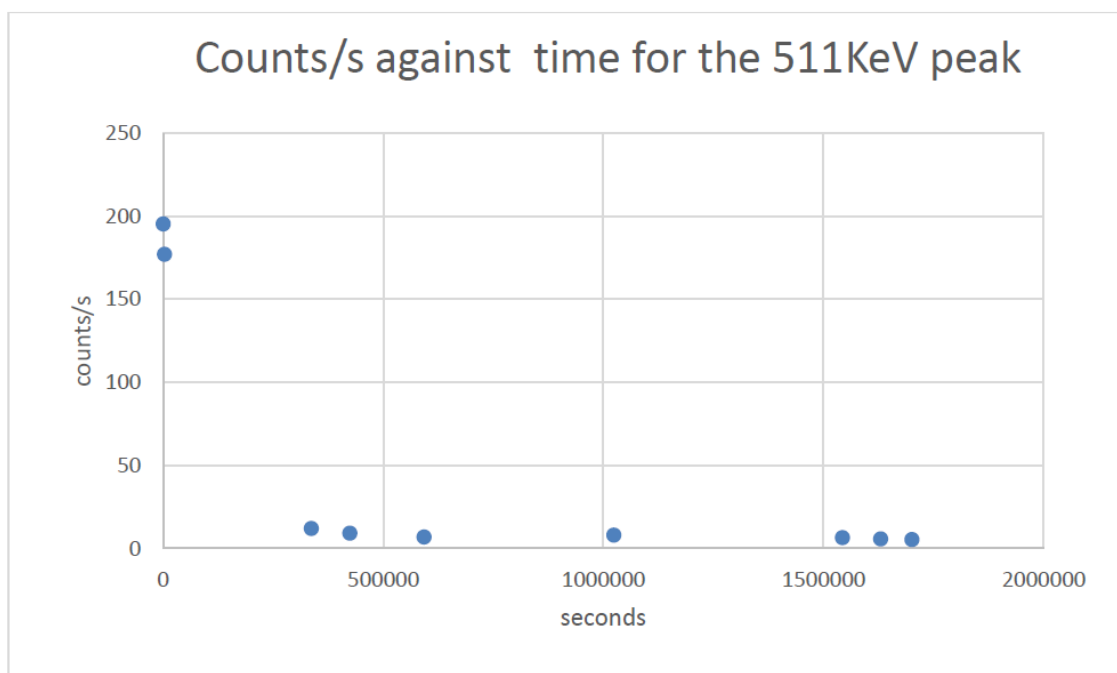


Figura 26 - Gráfico mostrando o decaimento do pico de 511 KeV

Legenda: *counts/s against time for the 511 KeV peak* – contagens por Segundo X tempo para a energia de 511 KeV , *counts/s* – contagens/s , *time* - tempo

Usando o mesmo método descrito para a amostra com alto teor de cobre, os resultados para o equivalente em dose estão na tabela 7.

Table 7 - Calculated Doses from Low Copper Sample

Date	13/fev	17/fev	18/fev	20/fev	25/fev	03/mar	04/mar	05/mar
Dose (μSv/h)	0,066610	0,012526	0,011983	0,010717	0,011893	0,010099	0,010181	0,009924

6.2.3.4 Folhas de ferro

As amostras de ferro foram cortadas em 20 fatias (exceto nas amostras de 3 e 9 MeV, nas quais foram fatiadas em 10 lâminas apenas), com 50μm cada, e irradiadas juntas para que se pudesse observar a penetração do próton no ferro. Os resultados para as folhas irradiadas a 20MeV estão nas figuras 27,28 e 29, enquanto os resultados completos estão em anexo.

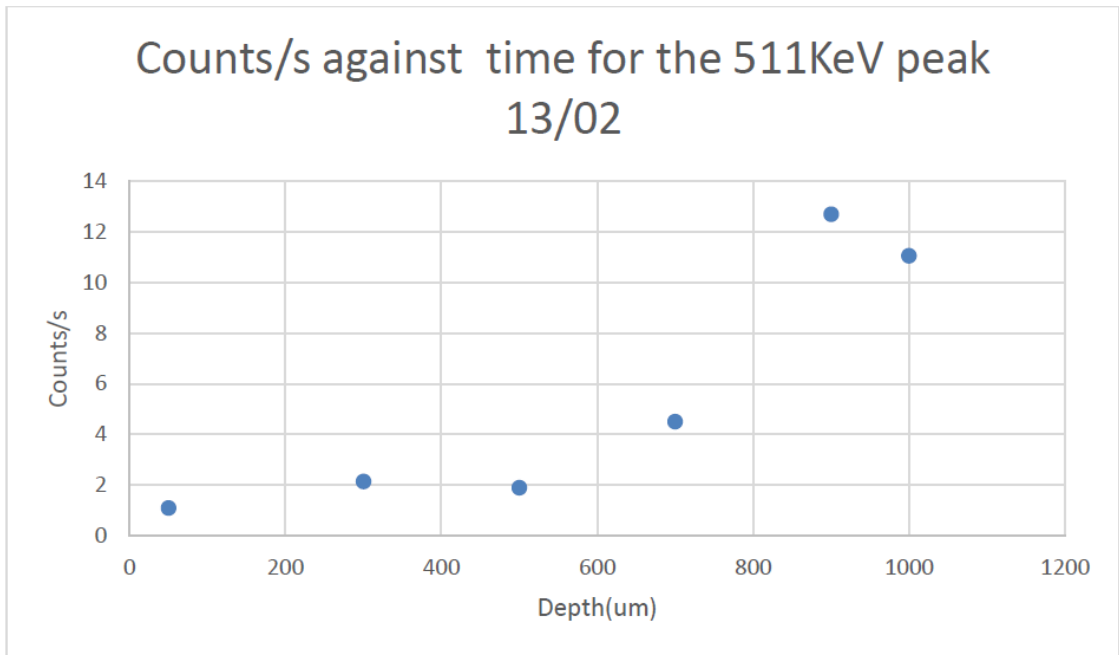


Figura 27 – Atividade X profundidade para as amostras irradiadas a 9 MeV, no dia 13 de fevereiro de 2014

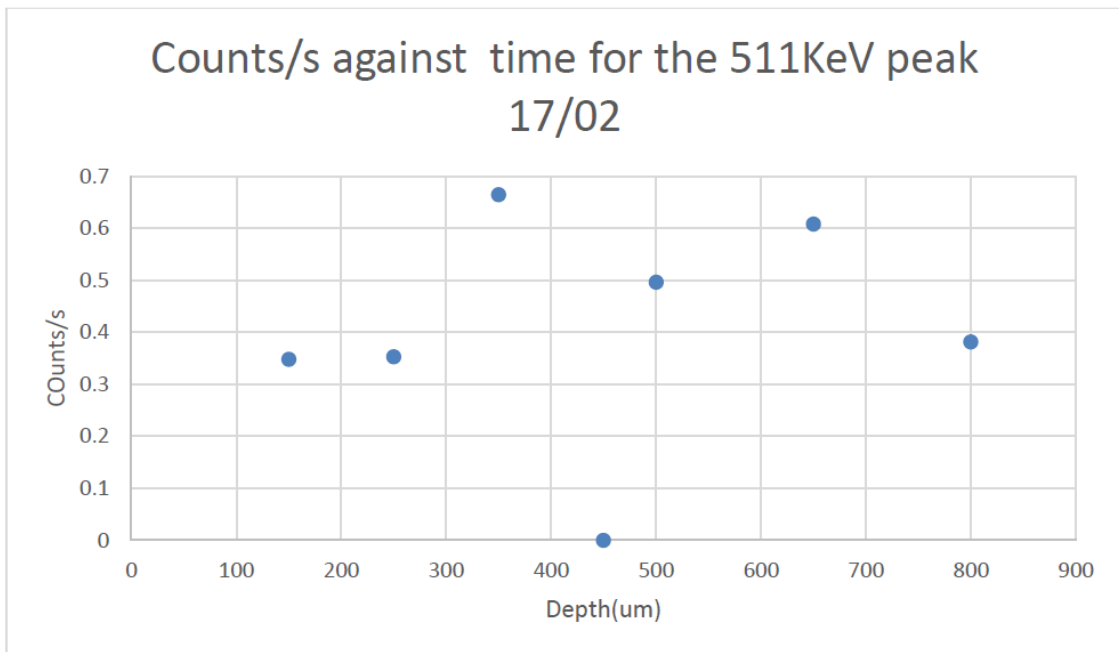


Figura 28 - Atividade X profundidade para as amostras irradiadas a 9 MeV, no dia 17 de fevereiro de 2014

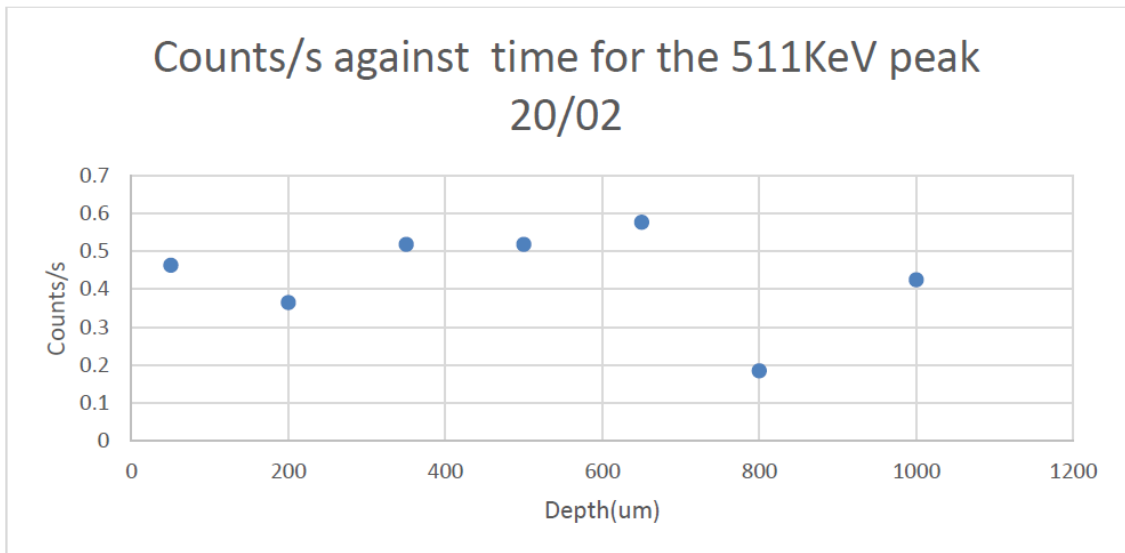


Figura 29 - Atividade X profundidade para as amostras irradiadas a 9 MeV, no dia 20 de fevereiro de 2014

Legenda: *counts/s against time for the 511 KeV peak* – contagens/s X tempo para o pico de 511 KeV , *Counts/s* – contagens/s , *depth* - profundidade

O primeiro ponto a se ressaltar é que o pico de 511 KeV foi o único que apareceu em todas as medidas, e portanto foi o único que foi acompanhado. No primeiro gráfico (figura 27) fica clara a distribuição da atividade ao longo da profundidade. Porém, com o passar do tempo, os gráficos ficaram menos consistentes e, eventualmente, apresentando um comportamento randômico. A razão para isto é que a atividade ficou tão pequena que se confundiu com o ruído e com a radiação de fundo, e parou de ser detectada. Este também é o motivo pelo qual as medições das folhas de ferro pararam no dia 20 de fevereiro, bem antes das outras amostras.

7 CONCLUSÃO

Apesar de não ter sido determinado quantitativamente (devido aos erros já citados), os aços que compõem o VP decaem muito rapidamente, principalmente devido ao efeito fotoelétrico. Isto faz com que eles sejam acessíveis a reparos e manutenções pouco tempo depois do reator ser desligado.

Em relação ao dano que o aço sofre, não foi possível obter resultados, pois as amostras foram contaminadas e o teste de dureza não pôde ser realizado. Outra coisa

notada é que a maior parte da interação do próton com estes aços ocorre a uma profundidade de aproximadamente 900 μm .

A diferença na atividade entre as duas amostras do aço pode ser explicada não pela diferença na quantidade de cobre, mas pela diferença de geometria de uma peça para a outra. Embora o colimador do ciclotron tenha sido o mesmo para ambas, as amostras eram menores que o colimador e diferentes entre si, fazendo com que cada amostra recebesse diferentes quantidades de radiação.

Um último ponto a ressaltar é que os resultados da segunda amostra de cada aço não foram discutidos pois há uma quantidade menor de dados sobre elas, fazendo com que os erros apontados anteriormente fiquem ainda mais aparentes, e os resultados finais muito erráticos.

Referências

Environmental Health & Safety, http://www.orcbs.msu.edu/radiation/programs_guidelines/radmanual/13rm_radiounits.htm, acessado em maio de 2014.

ICRP publication 103, Glossary.

Lesar, R. "Introduction to Computational Materials Science". Cambridge University Press, UK 2013.

Little, E.A. "Development of radiation resistant materials for advanced nuclear power plant". Materials Science and Technology, Vol. 22, No 5, 2006.

National Nuclear Data Center, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/decaysearchdirect.jsp?nuc=56CO&unc=nds>, acessado em fevereiro de 2014.

National Nuclear Data Center, carta interativa dos núclídeos, <http://www.nndc.bnl.gov/chart/chartNuc.jsp>

NRC Regulations, Title 10, Subpart 4.

Nuclear Physics Research Group, <http://www.np.ph.bham.ac.uk/pic/cyclotron>, acessado em fevereiro de 2014.

Palmer, B. "Emulation of Nêutron Damage on Iron and Stainless Steel Targets with Ion Radiation and Associated Activity After Irradiation Rewrite equations Take counting," Birmingham, UK, 2010.

SRIM, <http://www.srim.org/SRIM/SRIMINTRO.htm>, acessado em março de 2014.

The Physics Factbook, <http://hypertextbook.com/facts/2003/AlexSchlessingerman.shtml>, acessado em maio de 2014.

Vuolo, J.H. "Fundamentos da Teoria de Erros". São Paulo, Brasil

Was, G.S.; Busby, J.T.; Allen, T.; Kenik, E.A.; Jensson, A.; Bruemmer, S.M.; Gan, J. "Emulation of nêutron irradiation effects with prótons: validation of principle". Journal of Nuclear Materials 300 (2), pp.198-216, 2002.

Was, G.S.; Hash, M.; Odette, R.G. "Hardening and microstructure evolution in próton-irradiated model and commercial pressure-vessel steels". Philosophical Magazine, 85 pp.703-722, 2005

Was, G.S. "Fundamentals of Radiation Materials Science". London, UK, 2007.

Zhanga,Z.W.; Liua,C.T.; Wangb,L.; Millere,M.K.; Mab,D.; Chenc,G.; Williams,J.R; China,B.A. “Effects of próton irradiation on nanocluster precipitation in ferritic steel containing fcc alloying additions”. *Acta Materialia*, volume 60, pp.3034–3046, 2012.

Apêndice I

Dados da modelagem

Legenda: *energy* – energia , *depth* - profundidade

Depth (mm)	Energy (MeV)								
	0	10	13	15	18	20	23	26	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	1.88E+006	5.76E+007	1.07E+008	9.57E+007	1.02E+008	1.23E+008	1.26E+008	1.17E+008	
0.25	1.64E+006	6.50E+007	1.78E+008	2.61E+008	2.47E+008	2.87E+008	3.14E+008	3.05E+008	
0.5	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.94E+008	5.07E+008	5.27E+008	6.00E+008	6.20E+008	
0.75	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.47E+008	7.86E+008	8.40E+008	9.16E+008	
1	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.13E+008	1.10E+009	1.16E+009	
1.25	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.43E+009	
1.5	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	
1.75	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	
2	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	
2.25	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	
2.5	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	
2.75	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	
3	1.66E+006	6.48E+007	1.82E+008	3.96E+008	5.46E+008	8.15E+008	1.13E+009	1.49E+009	

Dados simulados da atividade inicial

Depth (mm)	Energy (MeV)								
	0	10	13	15	18	20	23	26	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	1.45E+005	2.30E+005	2.72E+005	1.65E+006	2.59E+006	3.53E+006	3.21E+006	2.16E+006	
0.25	1.96E+005	4.65E+005	6.01E+005	2.12E+006	4.86E+006	7.87E+006	8.60E+006	6.40E+006	
0.5	1.97E+005	5.15E+005	8.15E+005	2.70E+006	5.58E+006	1.26E+007	1.64E+007	1.52E+007	
0.75	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	5.91E+006	1.33E+007	2.18E+007	2.35E+007	
1	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.37E+007	2.28E+007	2.97E+007	
1.25	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.30E+007	3.10E+007	
1.5	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.15E+007	
1.75	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.14E+007	
2	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.14E+007	
2.25	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.14E+007	
2.5	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.14E+007	
2.75	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.14E+007	
3	1.97E+005	5.15E+005	8.17E+005	2.75E+006	6.01E+006	1.36E+007	2.31E+007	3.14E+007	

Dados simulados da atividade 3 horas após a exposição

Depth (mm)	Energy (MeV)								
	0	10	13	15	18	20	23	26	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	1.39E+005	1.61E+005	1.39E+005	6.88E+005	1.10E+006	1.55E+006	1.44E+006	9.87E+005	
0.25	1.90E+005	3.81E+005	3.80E+005	8.91E+005	2.04E+006	3.42E+006	3.83E+006	2.90E+006	
0.5	1.91E+005	4.31E+005	5.89E+005	1.30E+006	2.40E+006	5.38E+006	7.20E+006	6.81E+006	
0.75	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.71E+006	5.75E+006	9.46E+006	1.04E+007	
1	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.07E+006	9.95E+006	1.31E+007	
1.25	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
1.5	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
1.75	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
2	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
2.25	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
2.5	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
2.75	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	
3	1.91E+005	4.31E+005	5.90E+005	1.39E+006	2.75E+006	6.04E+006	1.02E+007	1.36E+007	

Dados simulados da atividade 24 horas após a exposição

Depth (mm)	Energy (MeV)								
	0	10	13	15	18	20	23	26	29
0.1	1.32E+005	1.53E+005	1.29E+005	7.38E+004	6.29E+004	7.41E+004	9.10E+004	9.70E+004	
0.25	1.80E+005	3.60E+005	3.57E+005	2.39E+005	1.76E+005	1.69E+005	2.14E+005	2.37E+005	
0.5	1.81E+005	4.08E+005	5.56E+005	6.12E+005	4.86E+005	3.46E+005	3.77E+005	4.50E+005	
0.75	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	8.07E+005	6.54E+005	5.47E+005	6.21E+005	
1	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.44E+005	8.42E+005	7.83E+005	
1.25	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.05E+006	
1.5	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.40E+006	
1.75	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.41E+006	
2	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.41E+006	
2.25	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.41E+006	
2.5	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.41E+006	
2.75	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.41E+006	
3	1.81E+005	4.08E+005	5.57E+005	7.21E+005	7.99E+005	9.52E+005	1.15E+006	1.41E+006	

Dados simulados da atividade 1 semana após a exposição

Tabela com o decaimento do ^{55}Co

$T_{1/2}=17.5\text{d}$	477KeV	931KeV	1408KeV
21600	675	1071	136
60660	212	416	43
172800	38	46	10
518400	13	6	1
1036800	16	7	0
1900800	16	6	0

Tabela com o decaimento do ^{56}Co

$T_{1/2}=77.23\text{d}$	846KeV	1037KeV	1238KeV	1771KeV	2598KeV
21600	287	44	100	13	5
60660	227	34	71	15	7
172800	218	24	78	12	12
518400	236	32	93	19	6
1036800	189	29	78	10	8
1900800	213	14	75	10	6
3542400	184	22	62	11	3

Tabela com o decaimento do ^{57}Ni

$T_{1/2} = 35.6\text{h}$	1377KeV	1919KeV	127KeV
21600	27	6	258
60660	20	1	109
172800	2	2	9
518400	0	2	9
1036800	2	2	0
1900800	2	2	9

Apêndice II

Resultados da ativação

Cálculo da resolução

Pico	N[umero do canal	Energia(keV)	FWHM (Canal)	FWHM(Energia)	Energia(keV)	Resolução
1	179,57	74,69	3,85	1,594285	74,69	0,0213454
2	204,22	84,89	1,96	0,811636	84,89	0,009561
3	1233,66	510,93	3,3	1,36653	510,93	0,0026746
4	2043,8	846,44	2,85	1,180185	846,44	0,0013943
5	2986,32	1237,01	3,45	1,428645	1237,01	0,0011549

Dados dos isótopos usados na calibração

21/11/2013	Atividade(Bq)	Precisão (%)
⁶⁰ Co	6240+-120	1,9
¹³³ Ba	45600+-2190	4,8
¹³⁷ Cs	191000+-7080	3,7
¹⁵² Eu	83200+-4160	5
²⁴¹ Am	415000+-20700	5

Resultados da eficiência

Fonte	Contagens (N)	t (s)	N/t	A	TB	Ângulo sólido	Energia(keV)	Eficiência
¹³³ Ba	3863	300	12,87667	44891,52	62,05%	0,0289	356,04	0,015996
¹³³ Ba	2794	300	9,313333	44891,52	32,90%	0,0289	81,07	0,02182
¹³³ Ba	985	300	3,283333	44891,52	18,34%	0,0289	302,86	0,013799
⁶⁰ Co	1171	900	1,301111	6047,579	99,85%	0,0289	1172,35	0,007456
⁶⁰ Co	1179	900	1,31	6047,579	99,98%	0,0289	1331,61	0,007497
¹³⁷ Cs	16911	300	56,37	189953,8	85,10%	0,0289	661,34	0,012066

Tabela com as datas das medidas

07/fev D	F	Fe	17/fev D	F	Fe	25/fev D	F	01/mar D	F
9MeV	9MeV	9MeV	20MeV - 1	20MeV - 1	20MeV	1MeV	1MeV	30MeV	30MeV
10/fev D	F	Fe	20MeV - 2	20MeV - 2		20MeV - 1	20MeV - 1	03/mar D	F
9MeV	9MeV	9MeV	3MeV	3MeV		20MeV - 2	20MeV - 2		1MeV
13/fev D	F	Fe	18/fev D	F	Fe	3MeV	3MeV	20MeV - 1	20MeV - 1
20MeV - 1	20MeV - 1	20MeV	20MeV - 1	20MeV - 1	20MeV	9MeV	9MeV	20MeV - 2	20MeV - 2
20MeV - 2	20MeV - 2	9MeV	20MeV - 2	20MeV - 2	3MeV	26/fev D	F	30MeV	30MeV
9MeV	9MeV		3MeV	3MeV		30MeV	30MeV	04/mar D	F
14/fev Fe			19/fev D	F	Fe	27/fev D	F	20MeV - 1	20MeV - 1
20MeV			1MeV	1MeV	20MeV	30MeV	30MeV	20MeV - 2	20MeV - 2
			3MeV	3MeV	3MeV	28/fev D	F	30MeV	30MeV
16/fev Fe			20/fev D	F	Fe	30MeV	30MeV	05/mar D	F
3MeV			1MeV	1MeV	20MeV			20MeV - 1	20MeV - 1
			20MeV - 1	20MeV - 1	3MeV			20MeV - 2	20MeV - 2
			20MeV - 2	20MeV - 2				30MeV	30MeV
			3MeV	3MeV					

Todas as medidas das atividades

Legenda: *marker* – marcador , *energy* – energia , *gross area* – área total , *net area* – área líquida , *uncertainty* – incerteza , *library* – biblioteca , *rate* – taxa , *channel* - canal

1MeV						
D	19/02/2014	12:04:44	1646s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate
179,19	74,53	59518	25016	374	Pb214	15,19806
204,84	85,14	39265	9152	281		5,560146
294,03	122,04	25211	1078	231	Co57	0,654921
1233,43	510,84	893	516	37		0,313487
1472,84	609,97	337	103	30	Ru103	0,062576
2691,53	1114,83	276	196	27	Tb160	0,119077
3523,31	1459,66	353	334	20	K40	0,202916
6307	2615,17	104	104	10		0,063183
D	20/02/2014	14:21:26	600s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate
179,37	74,61	15225	6394	168	Pb214	10,65667
205,07	85,24	11523	2664	157		4,44
1233,69	510,95	404	204	31		0,34
3524,62	1460,2	135	124	13	K40	0,206667
D	25/02/2014	15:47:24	300s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate
179,09	74,49	8129	3336	141	Pb214	11,12
204,8	85,12	5048	1232	97		4,106667
1235,83	511,83	205	105	26		0,35
3523,93	1459,91	58	58	7	K40	0,193333

F	19/02/2014	11:44:06	1103s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area u	Library	rate	
179,22	74,54	39110	17114	288	Pb214	15,51587	
204,93	85,18	29146	7113	256		6,448776	
1233,42	510,83	586	300	32		0,271985	
2693,84	1115,79	254	102	47	Zn65	0,092475	
3525,51	1460,57	206	180	16	K40	0,163191	
6302,54	2613,32	82	24	25		0,021759	

F	20/02/2014	14:10:10	600s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area u	Library	rate	
180,34	75,01	15830	6630	180	Pb214	11,05	
204,99	85,21	14305	3095	205		5,158333	
1234,78	511,4	458	160	37		0,266667	
2690,48	1114,39	149	41	37	Zn65	0,068333	
3525,34	1460,5	142	125	14		0,208333	

F	25/02/2014	16:01:01	300s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area u	Library	rate	
179,67	74,73	7204	3123	115	Pb214	10,41	
204,22	84,89	6447	1442	134		4,806667	
1234,78	511,4	155	71	17		0,236667	
2691,64	1114,87	53	34	11	Zn65	0,113333	
3522,21	1459,2	61	45	10	K40	0,15	

3MeV							
D	17/02/2014	15:32:23	699s live				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate	
179,46	74,64	12996	2875	121	Pb-214	4,113019	
204,58	85,03	10073	1855	119	Bi-207	2,653791	
1233,15	510,72	339	116	21	J-133 (iodine)	0,165951	
2689,33	1113,92	105	71	16	K-40	0,101574	
3517,13	1457,09	126	78	14	Xe-138	K40	0,111588
6298	2611,43	33	28	7		0,040057	
D	18/02/2014	15:39:55	600s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate	
178,57	74,27	15397	6659	173	Pb214	11,09833	
203,88	84,74	12131	2824	170	Ta182	4,706667	
1233,37	510,81	392	248	26	Y88	0,413333	
2692,06	1115,05	111	67	20	Tb160	0,111667	
2987,6	1237,55	79	54	13	Bi214	0,09	
3519,95	1458,26	115	90	14	I133	K40	0,15

D	19/02/2014	12:34:59	735s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library		rate
179,75	74,76	21864	9042	191	Pb214		12,30204
204,54	85,02	15241	3344	158	Bi207		4,54966
1232,95	510,64	413	191	25	I133		0,259864
2688,11	1113,41	119	57	20	Xe138		0,077551
3524,51	1460,15	150	145	12	K40		0,197279
D	20/02/2014	14:53:13	600s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library		rate
180,63	75,13	15212	6380	177	Pb214		10,63333
205,3	85,33	12001	2671	170	Bi207		4,451667
1233,39	510,82	397	154	31			0,256667
3524,57	1460,18	125	97	12	K40		0,161667
D	25/02/2014	15:27:13	300s				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library		rate
179,61	74,7	7728	3432	130	Pb214		11,44
204,71	85,09	5496	1240	108			4,133333
1232,74	510,55	157	94	15			0,313333
3520,07	1458,31	67	67	8	K40		0,223333

F	17/02/2014	15:33:51	600s live				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library		rate
179,85	74,8	14041	5731	144	Pb-214		9,551667
204,51	85,01	9424	1204	116	Bi-207		2,006667
1231,2	509,91	250	20	14	J-133		0,033333
294	122,03	2940	50	23	Co-57		0,083333
2694	1115,85	39	3	3	Zn-65		0,005
3520,39	1458,44	123	40	15	J-135		0,066667
6306,3	2614,88	24	18	6			0,03
F	18/02/2014	15:20:36	600s live				
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library		rate
178,47	74,23	17393	7314	198	Pb214		12,19
204,08	84,83	11256	2747	145	Bi207		4,578333
1233,43	510,84	431	197	36	Y88		0,328333
3522,06	1459,14	138	74	28	I135		0,123333
6301,17	2612,75	36	36	6			0,06

F	19/02/2014	13:40:57	300s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate
179,2	74,53	8428	3767	117	Pb214	12,55667
204,94	85,18	6962	1634	125	Bi207	5,446667
1233,47	510,86	162	97	17	Y88	0,323333
3525,33	1460,5	57	57	7	K40	0,19
F	20/02/2014	14:41:15	600s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate
180,19	74,95	15389	6847	184	Pb214	11,41167
205,94	85,6	10608	2582	150		4,303333
1234,2	511,16	426	224	32	Y88	0,373333
3526,59	1461,02	105	89	12	K40	0,148333
F	25/02/2014	15:34:48	300s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	Library	rate
179,68	74,73	7581	3280	124	Pb214	10,93333
204,55	85,02	5999	1255	124		4,183333
1232,88	510,61	152	76	17		0,253333
3523,4	1459,69	68	56	10	K40	0,186667

9MeV							
F	07/02/2014	300s	15:40:50				
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area	uncertainty	library	rate
179,72	74,75	12133	5108		165	Pb214	17,02667
204,35	84,94	7295	1322		115		4,406667
1233,62	510,92	24077	23053		173		76,84333
1616,3	669,37	327	147		19	I132	0,49
1993,9	825,77	556	395		30	Co60	1,316667
2043,37	846,26	806	585		36	Mn56	1,95
2102,44	870,73	458	250		32	Nb94	0,833333
2987,9	1237,67	432	312		30	Bi214	1,04
3215,24	1331,92	1300	1204		41	Co60	4,013333
3459,63	1433,25	334	249		24	Cs138	0,83
4321,53	1790,76	467	444		24	I135	1,48
F	07/02/2014	300s	17:22:18				
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area	uncertainty	library	rate
179,55	74,68	10186	3914		164		13,04667
204,45	84,98	6630	1794		121		5,98
1233,66	510,93	3459	3160		69		10,53333
2043,83	846,45	672	597		29	Mn56	1,99
2503,96	1037,09	122	90		13	Co56	0,3
2986,32	1237,01	329	294		20	Co56	0,98
3213,18	1331,06	82	54		13		0,18
3526,9	1461,15	74	62		11		0,206667
F	10/02/2014	900s	17:26:51				
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area	uncertainty	library	rate
179,65	74,72	37598	17354		267		19,28222
204,52	85,01	30257	7217		276		8,018889
1233,25	510,76	2378	1784		61		1,982222
2043,07	846,14	1825	1594		47	Mn56	1,771111
2505,27	1037,64	304	194		22	Co56	0,215556
3523,61	1459,78	230	165		23		0,183333
4273,25	1770,73	223	166		23	Co56	0,184444
F	13/02/2014	300s	15:14:17				
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area	uncertainty	library	rate
179,81	74,79	10595	4297		168	Pb214	14,32333
204,97	85,2	5470	1323		90		4,41
1233,82	511	612	413		32		1,376667
2043,83	846,45	611	571		26	Mn56	1,903333
2505,94	1037,92	108	34		14	Co56	0,113333
2989,77	1238,45	295	276		19	Co56	0,92
3519,83	1458,21	76	49		14	I135	0,163333
4273,42	1770,8	91	71		15	Co56	0,236667

F	25/02/2014	300s	16:09:44			
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area uncertainty	library	rate
179,18	74,53	7885	3381	129	Pb214	11,27
204,33	84,93	7109	1580	150		5,266667
1233,21	510,75	604	409	38		1,363333
5042,98	846,1	571	527	26	Mn56	1,756667
2501,31	1036	93	52	13	?	0,173333
2986,95	1237,28	286	260	19	I133	0,866667
3523,63	1459,79	78	63	12	K40	0,21
4274,29	1771,16	65	50	11	Co56	0,166667

D	07/02/2014	300s	15:31:31			
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area uncertainty	library	rate
179,86	74,81	10486	2543	158	Pb214	8,476667
204,55	85,02	9137	1596	171		5,32
1233,78	510,98	10350	9668	119		32,22667
1993,51	825,61	711	496	35	Co60	1,653333
2043,79	846,44	800	576	37	Mn56	1,92
2101,74	870,44	420	249	28	Nb94	0,83
2988,28	1237,83	379	281	26	Bi214	0,936667
3214,81	1331,74	1477	1369	43	Co60	4,563333
3460,17	1433,47	423	366	24	Cs138	1,22
4320,63	1790,39	599	539	31	I135	1,796667
D	07/02/2014	300s	17:16:37			
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area uncertainty	library	rate
179,61	74,7	9832	4294	147		14,31333
204,32	84,93	6413	1426	114		4,753333
1233,57	510,9	1340	1125	44		3,75
1596,8	661,3	287	168	29	Cs137	0,56
2043,62	846,36	667	580	29	Mn56	1,933333
2504,58	1037,35	206	142	30	Mn56	0,473333
2987,04	1237,31	299	271	20	Bi214	0,903333
3214,68	1331,69	104	86	14	Co60	0,286667
3525,59	1460,6	62	46	10	I135	0,153333
4271,89	1770,17	80	80	8	Co56	0,266667
D	10/02/2014	900s	17:10:25			
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area uncertainty	library	rate
179,88	74,82	41470	16675	334		18,52778
204,54	85,02	34295	7325	339		8,138889
1233,43	510,84	1540	1073	52		1,192222
2043,29	846,23	1865	1696	52	Mn56	1,884444
2505,96	1037,92	364	174	52		0,193333
2987,34	1237,44	860	786	52	Bi214	0,873333
3524,27	1460,06	259	230	52	I135	0,255556
4273,68	1770,91	218	218	52	Co56	0,242222
4905,11	2032,96	77	62	52	Co56	0,068889
6267,76	2598,87	151	127	52	Co56	0,141111

D	13/02/2014	300s	15:34:21			
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area uncertainty	library	rate
180,58	75,1	8008	3495	115	Pb214	11,65
204,98	85,2	6852	1532	125		5,106667
1234,05	511,1	872	639	40		2,13
2043,62	846,37	643	585	27	Mn56	1,95
2504,59	1037,36	153	119	16	Mn56	0,396667
2987,06	1237,32	325	253	27	Bi214	0,843333
3520,11	1458,33	56	41	10	I135	0,136667
4269,11	1769,01	62	53	11	Co56	0,176667
4908,83	2034,5	31	21	10	Co56	0,07
6266,69	2598,42	47	47	6	Co56	0,156667
D	25/02/2014	300s	16:20:03			
Channel	Energy(keV)	gross area	net area	netr area uncertainty	library	rate
180,09	74,9	7445	3316	122	Pb214	1105%
204,39	84,96	5739	1152	115		384%
1233,91	511,04	724	526	38		175%
2042,76	846,01	648	568	31	Mn56	189%
2503,53	1036,92	112	72	16	Mn56	24%
2989,11	1238,17	266	254	17	Bi214	85%
3522	1459,11	73	38	15	I135	13%
4267	1768,14	51	35	12	Xe138	12%
6253,45	2592,92	44	36	9	?	12%

30MeV					
F	26/02/2014	15:05:53	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
178,62	74,29	19929	8325	202	27,75
1151,49	476,92	13530	9526	165	31,75333
1232,96	510,64	78329	72719	329	242,3967
1795,42	743,56	3901	2120	89	7,066667
1939,32	803,16	2210	570	99	1,9
2043,01	846,11	4115	2942	101	9,806667
2246,65	930,48	23294	22132	179	73,77333
2986,76	1237,2	1975	1077	86	3,59
3175,05	1315,25	1621	1333	57	4,443333
3322,44	1376,37	2094	1793	60	5,976667
3396,92	1407,24	3294	3162	63	10,54
3458,54	1432,8	1627	1431	49	4,77
6268,21	2599,05	218	148	29	0,493333
F	27/02/2014	11:17:54	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1151,44	476,89	8410	4154	200	13,84667
1232,88	510,61	37307	32614	279	108,7133
1795,42	743,56	3913	1757	142	5,856667
2043,07	846,14	3869	2719	111	9,063333
2246,61	930,46	11949	11074	139	36,91333
2986,82	1237,22	1756	1448	60	4,826667
3175,22	1315,33	752	666	34	2,22
3322,71	1376,48	1277	919	66	3,063333
3397,12	1407,33	1581	1428	50	4,76
3548,38	1432,73	1397	1289	44	4,296667
6262,63	2596,74	177	167	15	0,556667
F	28/02/2014	18:45:21	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1151,21	476,8	2921	1175	99	3,916667
1232,79	510,57	15555	13697	165	45,65667
1795,14	743,44	2999	1753	118	5,843333
2042,74	846	3492	2628	104	8,76
2246,47	930,4	4955	4430	90	14,76667
2986,77	1237,2	1570	1145	65	3,816667
3174,31	1314,95	331	209	30	0,696667
3322,66	1376,45	833	665	50	2,216667
3397,06	1407,3	507	428	30	1,426667
3458,58	1432,82	1237	1153	45	3,843333
6268,05	2598,99	173	162	16	0,54

F	01/03/2014	13:09:30	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1151,17	476,78	2240	623	110	2,076667
1232,67	510,52	9539	7704	159	25,68
1795,28	743,5	2490	1545	102	5,15
2042,57	845,93	3093	2725	73	9,083333
2251,53	932,5	3214	2642	93	8,806667
2986,19	1236,96	1724	1332	80	4,44
3323,29	1376,72	438	363	31	1,21
3397,12	1407,33	261	182	25	0,606667
3458,49	1432,78	1064	1008	36	3,36
6267,68	2598,83	194	180	19	0,6
F	03/03/2014	14:44:10	600s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1151,6	476,96	2533	271	128	0,903333
1232,97	510,65	9793	7180	171	23,93333
1795,37	743,53	3472	2378	101	7,926667
2042,92	846,07	6263	5107	137	17,02333
2256,65	934,62	3524	2600	116	8,666667
2986,27	1236,99	2850	2482	71	8,273333
3321,75	1376,08	514	244	58	0,813333
3459,14	1433,05	1718	1563	51	5,21
6267,77	2598,87	386	258	40	0,86
F	04/03/2014	14:49:21	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,21	510,75	3915	2391	138	7,97
1795,62	743,64	1517	871	79	2,903333
2043,21	846,19	2586	2292	64	7,64
2257,08	934,8	1282	898	71	2,993333
2986,63	1237,14	1415	1171	66	3,903333
3458,8	1432,9	719	671	34	2,236667
6265,05	2597,74	175	175	13	0,583333

F	05/03/2014	10:56:25	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,35	510,8	3878	2351	137	7,836667
1795,7	743,67	1497	804	85	2,68
2043,18	846,18	2672	2187	78	7,29
2256,94	934,74	1081	803	52	2,676667
2986,96	1237,28	1277	1040	52	3,466667
3459,23	1433,08	680	638	32	2,126667
6267,61	2598,8	163	155	14	0,516667
F	10/03/2014	13:42:36	600s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,37	510,81	5890	3671	158	6,118333
1795,64	743,65	1447	864	60	1,44
2043,14	846,17	5331	4762	97	7,936667
2256,96	934,75	1524	820	86	1,366667
2987,22	1237,39	2705	2365	82	3,941667
3458,99	1432,98	798	567	57	0,945
6264,64	2597,57	356	309	26	0,515

30MeV						
D	26/02/2014	16:53:47	300s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate	
1151,55	476,96	17230	9565	287	31,88333	
1233,03	510,67	81022	73118	409	243,7267	
1795,54	743,61	4487	2107	116	7,023333	
2042,96	846,09	4541	2283	154	7,61	
2246,56	930,44	23745	22193	196	73,97667	
2504,43	1037,29	1468	161	97	0,536667	
2986,54	1237,11	2166	1389	93	4,63	
3175,2	1315,32	1651	1455	53	4,85	
3322,8	1376,51	2124	1840	67	6,133333	
3397,13	1407,33	3201	3103	61	10,34333	
3458,39	1432,74	1598	1505	47	5,016667	
4270,98	1769,79	483	404	43	1,346667	
D	27/02/2014	11:09:46	300s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate	
1151,46	476,9	9689	4777	239	15,92333	
1232,89	510,62	40767	36892	255	122,9733	
1795,39	743,55	3588	1971	108	6,57	
2042,73	846	3462	2644	86	8,813333	
2246,53	930,43	13045	11771	172	39,23667	
2503,3	1036,82	1527	282	122	0,94	
2986,54	1237,11	1835	1278	81	4,26	
3175,01	1315,24	916	679	48	2,263333	
3322,98	1376,59	1487	1243	64	4,143333	
3396,76	1407,18	1633	1509	50	5,03	
3458,33	1432,71	1431	1356	44	4,52	
4272,52	1770,43	269	227	21	0,756667	
D	28/02/2014	18:36:55	300s			
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate	
1151,32	476,84	3228	1407	120	4,69	
1232,78	510,57	16118	13675	193	45,58333	
1795,23	743,48	2523	1445	88	4,816667	
2042,67	845,97	3278	2511	98	8,37	
2246,75	930,52	5125	4406	113	14,68667	
2503,23	1036,79	928	392	74	1,306667	
2986,43	1237,06	1606	1314	66	4,38	
3177,27	1316,17	338	215	33	0,716667	
3321,93	1376,15	629	539	34	1,796667	
3398,24	1407,79	555	441	37	1,47	
3458,15	1432,64	1208	1115	43	3,716667	
4271,02	1769,81	326	249	34	0,83	

D	01/03/2014	12:59:39	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1151,28	476,83	2159	451	113	1,503333
1232,62	510,5	9497	7313	177	24,37667
1795,2	743,47	2493	1365	117	4,55
2043,79	846,02	3553	2545	130	8,483333
2246,89	930,58	2997	2436	84	8,12
2502,41	1036,45	610	223	52	0,743333
2986,55	1237,11	1618	1309	65	4,363333
3322,02	1376,19	482	352	41	1,173333
3396,72	1407,16	279	214	24	0,713333
3458,18	1432,65	988	921	37	3,07
4271,32	1769,93	308	192	39	0,64
D	03/03/2014	14:33:00	600s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,48	510,86	8162	6422	122	21,40667
1795,89	743,75	3444	2016	124	6,72
2043,25	846,21	5709	4933	102	16,44333
2257,09	934,8	3263	2376	108	7,92
2503,8	1037,03	1279	598	79	1,993333
2987,21	1237,38	2961	2518	85	8,393333
3322,12	1376,23	437	298	35	0,993333
3458,95	1432,97	1639	1344	69	4,48
4272,98	1770,62	559	445	35	1,483333
D	04/03/2014	14:42:18	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,71	510,96	3684	2532	116	8,44
1796,26	743,9	1215	739	59	2,463333
2043,36	846,26	2759	2286	82	7,62
2257,7	935,06	1219	846	62	2,82
2504,11	1037,16	492	275	39	0,916667
2987,3	1237,42	1365	1134	57	3,78
3459,09	1433,02	689	605	37	2,016667
4274,14	1771,1	290	136	46	0,453333

D	05/03/2014	11:02:31	300s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,04	510,68	3423	2415	99	8,05
1795,5	743,59	1244	901	57	3,003333
2042,72	845,99	2837	2195	98	7,316667
2256,63	934,61	1048	721	58	2,403333
2504,49	1037,31	462	281	33	0,936667
2986,88	1237,25	1267	1095	48	3,65
3458,18	1432,65	633	535	42	1,783333
4272,14	1179,27	273	157	39	0,523333
D	10/03/2014	13:31:02	600s		
marker	energy(KeV)	gross area	net area	net area uncertainty	rate
1233,1	510,7	5530	3813	128	6,355
1795	65	680	1127	66	1,878333
2043,12	846,16	5392	4184	125	6,973333
2257,82	935,11	1553	911	88	1,518333
2503,36	1036,85	1108	499	79	0,831667
2987,1	1237,34	2465	2197	71	3,661667
3458,71	1432,87	818	660	46	1,1
4268,65	1768,83	549	408	45	0,68