

F 530 - Instrumentação I

Relatório Final

“Montagem Experimental para estudo da dependência energética da resposta de um detector de partículas alfa”



Aluno: Ará Kedikian

arakkedikian xarrobax gmail.com

Coordenador da disciplina: José Joaquín Lunazzi

<https://portal.ifi.unicamp.br/pessoas/corpo-docente/314-prof-dr-jose-joaquin-lunazzi>

Orientador: Sandro Guedes de Oliveira

<https://portal.ifi.unicamp.br/pessoas/corpo-docente/288-prof-dr-sandro-guedes-de-oliveira>

Co-orientador: Arnaldo Luis Lixandrão Filho

<https://portal.ifi.unicamp.br/pessoas/funcionarios/123-arnaldo-luis-lixandrao-filho>

20 de Novembro de 2016

Inst. de Física “Gleb Wataghin” - UNICAMP

RESUMO

A “Montagem Experimental para estudo da dependência energética da resposta de um detector de partículas alfa” consistiu em elaborar um sistema de curso para variar as posições de detectores PADC, $C_{12}H_{18}O_7N$ (nome comercial: CR 39), com o intuito de calibrar o sistema para espectrometria de partículas alfa.

Através de uma impressora desmontada projetamos um curso para o sistema. Irradiamos 8 PADCs e analisamos, 100 fotos por detector, através de um Script em R. Simulamos alcance e energias de partículas alfa no ar através de um software chamado SRIM e calibramos o Script e os dados obtidos.

Irradiamos algumas posições dos detectores com uma fonte de Am-241 para análise de traços de partículas alfa. Tempos de exposição e distâncias da fonte radioativa ao detector foram planejados a partir da fluência de partículas alfa por área. Experimentalmente, modificamos o traço latente através de um ataque químico gerando uma nova entidade, traço definitivo (buracos circulares). Por fim associamos o nível de cinza e o tamanho dos traços com a energia simulada, calibrando o sistema.

INTRODUÇÃO

Partículas alfa são idênticas a núcleos de Hélio, contém 2 prótons e 2 nêutrons. O decaimento alfa é um processo de desintegração nuclear, ele pode ocorrer quando $E_\alpha = [m(Z, A) - m(Z - 2, A - 4) - m_\alpha]c^2 > 0$ é satisfeita. Para núcleos com $A > 150$ essa desintegração é favorável.

O Am-241, isótopo de Amerício usado em questão é o tipo mais comum do elemento, tem meia vida de 432,2 anos e seu principal decaimento é o alfa.

Utilizamos detectores de radiação para medir propriedades de partículas que foram emitidas em um certo processo. Uma das propriedades é a energia. Através da interação das partículas com o detector há uma deposição parcial ou integral de energia. No caso de detectores de estado sólido, as partículas carregadas, partículas alfa no caso em questão, quebram as cadeias moleculares e sua estrutura é modificada, o efeito da partícula no sólido dependerá do tipo de alvo. O detector

usado neste trabalho é o PADC; polímero - $C_{12}H_{18}O_7N$, cujo nome comercial é CR-39. A energia depositada em uma camada de PADC por partículas alfa é determinada pela energia de freamento (“Stopping Power”) no material (Ghazaly, M. El, e H.e. Hassan, 2014). Quando a partícula alfa atinge o CR-39, deixa um rastro de comprimento da ordem da dezena de micrômetros e diâmetros de 5 a 20 nm é formado chamado de traço latente.

O PADC foi utilizado em monitoramento de radônio ambiental (por exemplo, Hadler et al., 2008) e monitoramento do fluxo de nêutrons na Terapia de Captura de Nêutrons pelo Boro (Smilgys et al., 2013). Depois da partícula atingir o PADC, o mesmo é tratado quimicamente, através do método de ataque químico, corroendo principalmente a região em volta do traço latente, formando um canal, chamado simplesmente de traço e que é visível ao microscópio óptico.

OBJETIVOS

O objetivo deste projeto de instrumentação é de construir um dispositivo que consiste em uma montagem experimental de uma fonte radioativa alinhada a um detector que possa ser colocado a diferentes distâncias.

Como objetivo secundário, calibraremos o detector PADC para partículas alfa de diferentes energias, obtendo assim um sistema portátil e verificando energia para outras fontes radioativas.

MATERIAIS E MÉTODOS

SIMULAÇÃO E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nessa montagem devemos ter um curso entre a fonte e o detector para a obtenção de várias energias de incidência no detector através da exposição do PADC e a fonte utilizada, ^{241}Am com energia de 5,5 MeV. O dispositivo deve ter um conjunto transmissor que varie a distância do detector com a fonte, no caso um sistema de polias acoplado a um motor de passo.

A primeira etapa feita foi a simulação do alcance de partículas alfa emitidas da fonte utilizando o ar como barreira, ou seja, qual a distância que as partículas alfa conseguem penetrar no ar. Fizemos essa simulação utilizando o SRIM (“The Stopping and Range of Ions in Matter”) - www.srim.org, um software que calcula interações de íons com a matéria (Ziegler, Biersack, and Ziegler, 2008) ; ele é bastante utilizado na pesquisa de implantação de íons, por exemplo na fabricação de semicondutores. O SRIM utiliza do método de simulação Monte Carlo. O processo implementado no programa é explicado detalhadamente no livro: "SRIM - The Stopping and Range of Ions in Solids" (J. F. Ziegler and J. P. Biersack ,1985).

Através do SRIM simulei partículas alfa (He 2+) no ar, descrito abaixo na entrada do programa. A fonte encontrada no Laboratório do Grupo de Cronologia do DRCC é monoenergética de ^{241}Am , que emite partículas alfa com energia de 5,5 MeV, ou seja, 5500 keV que foi justamente o valor de entrada.

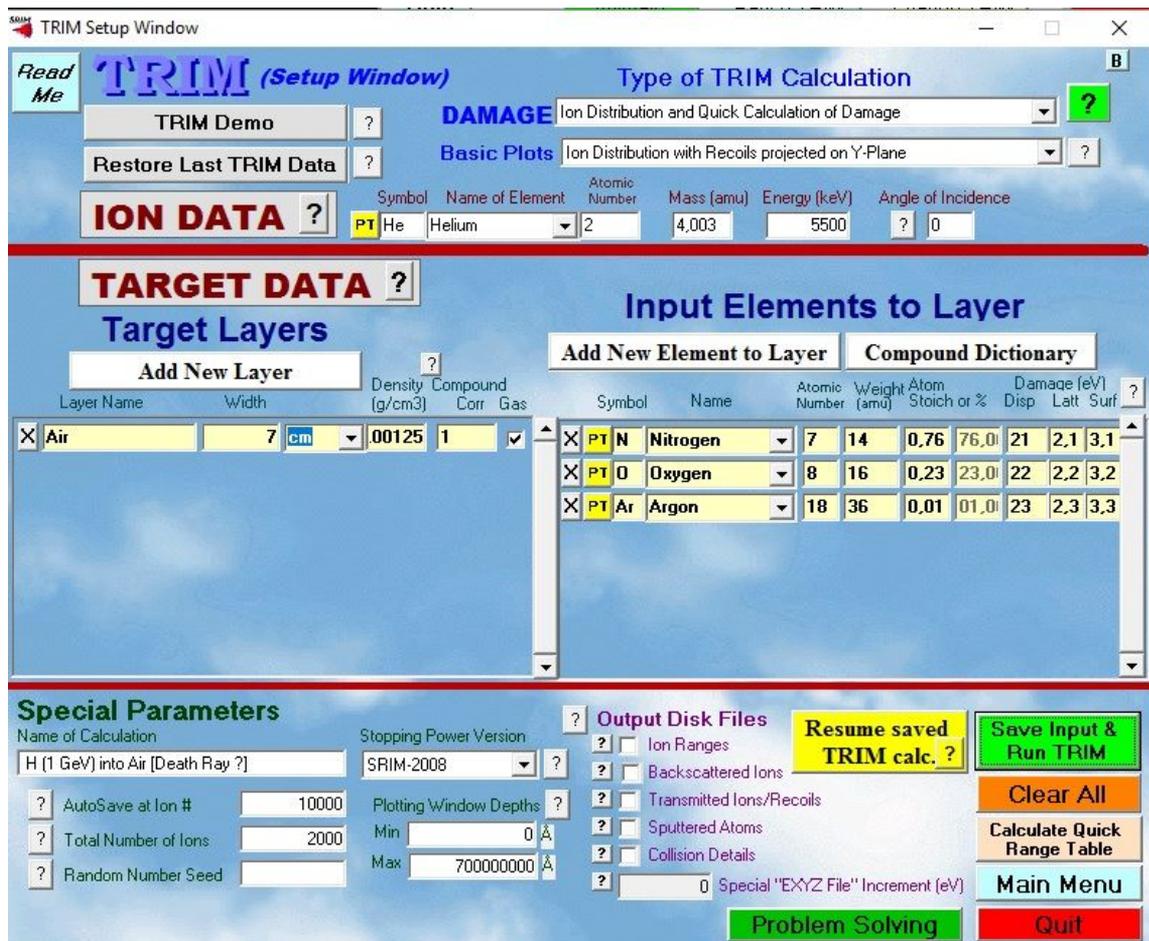


Figura 1: Parâmetros de entrada do software “SRIM” com a tela inicial “Setup”

As outras entradas importantes são a densidade do ar ($0,00125\text{ g/cm}^3$) e 7 cm de barreira de ar.

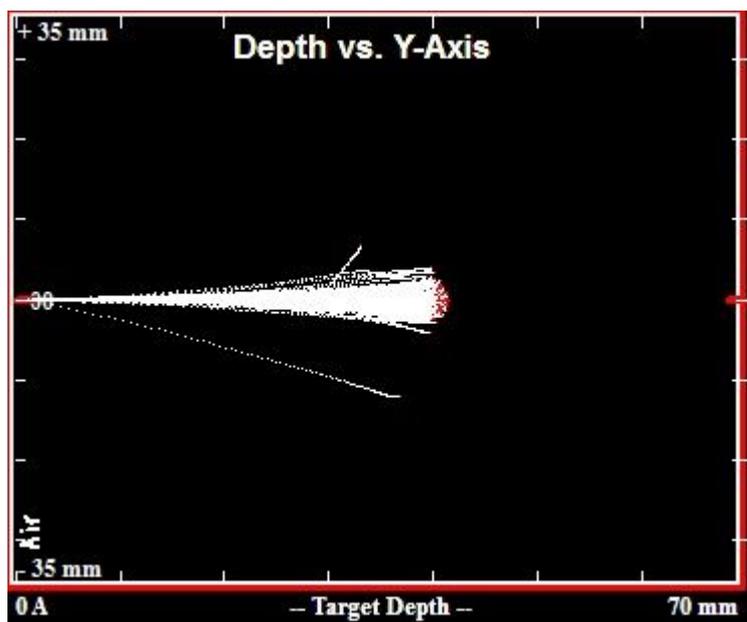


Figura 2: Simulação dos dados de entrada da figura 1

Através da figura 2, conseguimos estipular a distância que precisamos do eixo, no caso aproximadamente 4,5 cm.

Procuramos então um sistema que suportasse a fonte, um curso variável com a distância máxima aproximadamente pela calculada através do alcance máximo de partículas alfa pelo ar através do SRIM.

No Apêndice é encontrada a simulação em forma de tabela do SRIM para alcances da partícula alfa para cada energia incidente e abaixo, uma interpolação da tabela do apêndice variando 0,5 cm do alcance de 5,5 MeV até o início do cursor.

Energia Alfa (MeV)	Alcance (mm)
5,5	40,1
4,8	35,1
4,5	30,1
4,4	29,6
3,9	24,6
3,3	19,6

2,6	14,6
1,8	9,6
0,8	4,6

Tabela 1: Energia incidente das partículas alfa e seu alcance no ar

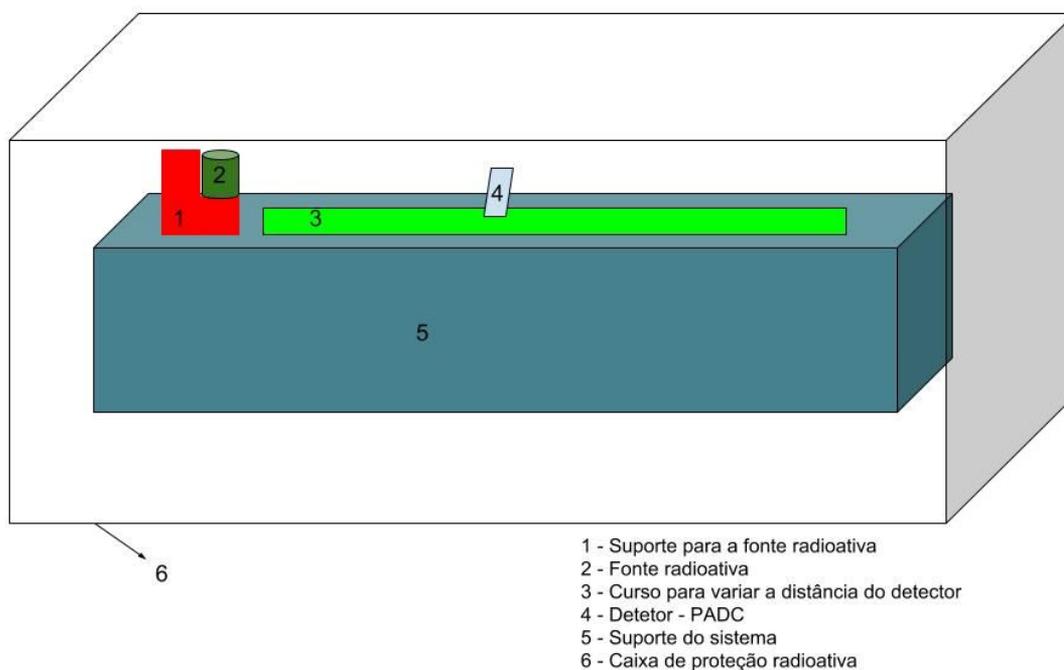


Figura 3: Desenho da montagem experimental que precisamos.

MONTAGEM EXPERIMENTAL

A ideia é reutilizar alguns materiais, desmontamos uma impressora Hp Deskjet 390c e tentamos moldar o nosso sistema de eixos com movimentação da própria impressora.

A princípio o eixo que suporta o cartucho de impressão seria ideal à estrutura do nosso sistema, mas não conseguimos montar um suporte estável e de fácil alinhamento para o detector.

Então usamos a estrutura de repouso do cabeçote de impressão, função de limpar o cabeçote na utilização da impressora, escolhemos essa estrutura pois ela tem um curso maior que o alcance das partículas alfa no ar. A estrutura móvel contém de um motor de passo acoplado a um sistema de polias, um conjunto transmissor. A velocidade com que o sistema se desloca depende do diâmetro das polias. Sendo assim, polias do mesmo tamanho transmitem a mesma velocidade de entrada, no caso manual ou do motor, mas se a polia acoplada ao motor for maior que a polia movida a velocidade transmitida ao sistema será maior. Para o futuro advento do controle de motor de passo temos a seguinte relação entre as polias: $n_1/n_2 = D_2/D_1$, $n_{1,2}$ é a velocidade de rotação e $D_{1,2}$ é o diâmetro das polias, o índice 1 é para a polia acoplada ao motor e o índice 2 para a polia movida.

Por fim, mudamos a distância do detector à fonte através do sistema de polias.

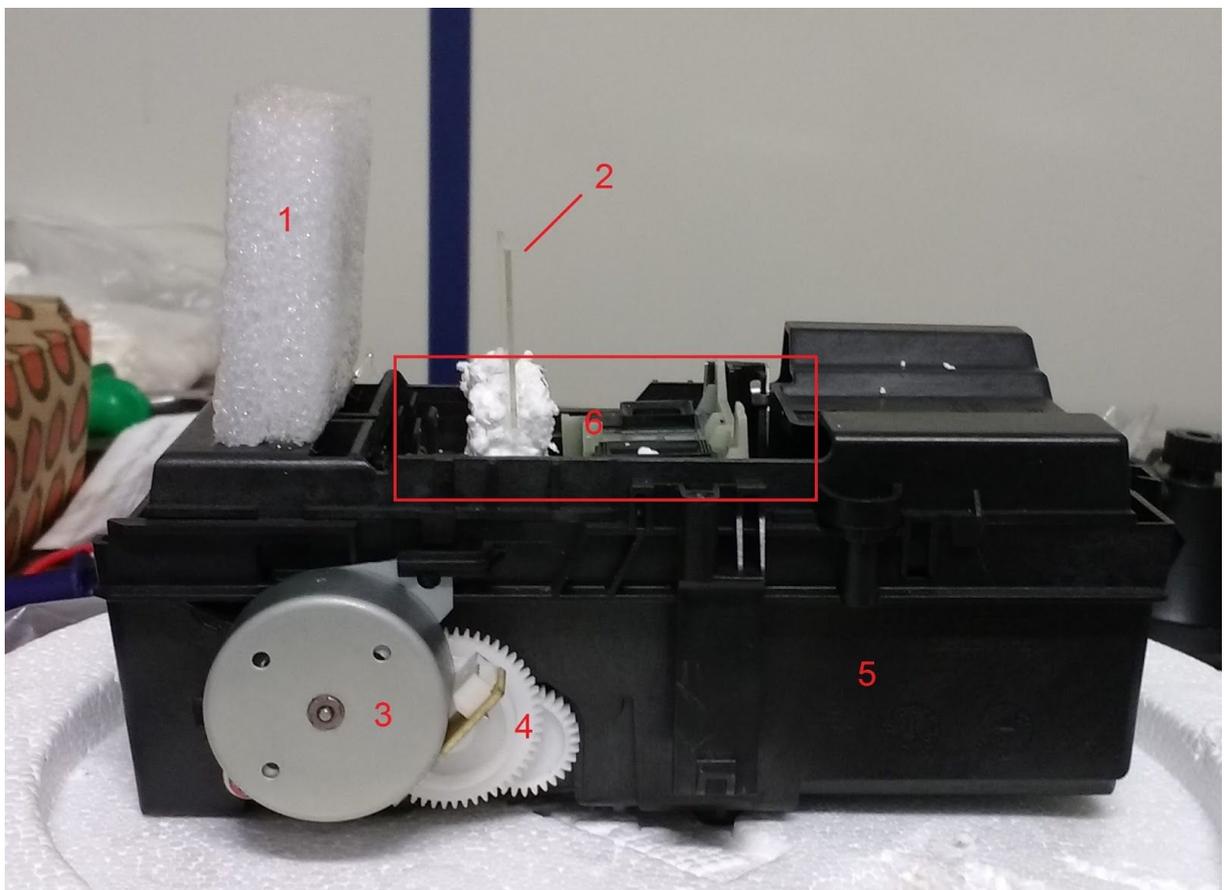


Figura 4: Sistema de curso com polias e motor de passo: 1 - Suporte para a fonte radioativa, 2 - Detector (no caso CR-39) com suporte, 3 - motor de passo, 4 - Sistema de Polias, 5 - Estrutura do sistema de limpeza do cartucho de impressora, 6 - Sistema de curso para distâncias variáveis do detector à fonte

O suporte da fonte radioativa foi de poliestireno fixada com cola quente na estrutura de repouso do cabeçote.

No estágio parcial da Instrumentação, para suporte do detector foi utilizado isopor, protegendo radiologicamente o sistema utilizei o poliestireno em forma de retângulo, as partes foram fixadas umas nas outras com cola quente.



Figura 5: Proteção radiológica do sistema em forma retangular

Por fim, alinhei a altura do detector e o suporte da fonte radioativa através de uma régua de nível para as medidas futuras cobrirem uma boa parte do detector.

Todos os materiais foram retirados e utilizados no Laboratório do Grupo de Cronologia do DRCC.

Porém, re-adaptamos o sistema apresentado anteriormente, pois o CR-39 estava suportado por um isopor e não conseguimos um nivelamento razoável. Adaptamos com uma peça de acrílico colada com dupla face e uma capa de plástico prendemos o CR-39 através de ruelas.

Encontramos também uma chapa em um dos componentes da impressora que utilizamos como porta para barrar a fonte radioativa de imediato, utilizamos um contador Geiger para verificar se não havia passagem de partículas alfa.



Figura 6: Porta de barragem para exposição da fonte radioativa de Am-241.



Figura 7: Nova montagem com a barragem para melhor nivelamento

Para distâncias curtas, até 2,5 cm da fonte, o parafuso que prende o CR-39 bloqueia o curso para irradiação. No entanto, utilizamos uma outra barreira adaptada com um palito de madeira e uma peça de metal acoplada em sua extremidade. Testamos através de um contador Geiger e somente com a madeira não barrou-se totalmente as partículas alfa, por isso acoplamos a peça de metal.

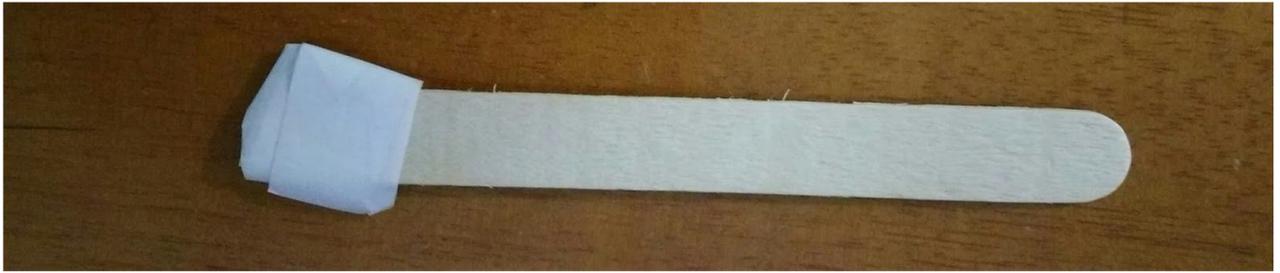


Figura 8: Segunda barreira de partículas alfa para curtas distâncias, adaptada com um palito de madeira e uma peça de metal acoplada em sua extremidade.

ATAQUE QUÍMICO E MÉTODO DE ANÁLISE

Depois de cada exposição da fonte de Am-241, que será descrita nas seções a seguir, a partícula alfa deixa um traço no PADC chamado de traço latente. Para análise no microscópio, devemos atacar esse traço latente quimicamente para transformar os traços latentes em outra entidade, traços (buracos).

Para detectores PADC esse ataque químico deve ser feito com uma solução de NaOH com uma concentração de 6,25M a uma temperatura de 70 °C por 400 minutos.

Para preparar a solução dissolvemos 50 g de soda cáustica em um béquer com água deionizada, principal tipo de água utilizada em experimentos químicos, misturando a solução até que a soda cáustica seja dissolvida por completo. Essa é uma reação exotérmica, logo em todo processo há liberação de calor que é notada através de um simples toque dos dedos na superfície do béquer. Transferimos a solução para um balão volumétrico de 200ml e fomos completando com água deionizada até de 200ml, misturando a solução já preparada juntamente com banho de água fria para controlar a dilatação devido ao calor liberado pela reação.

Ligamos o banho térmico a 70°C, com temperatura controlável com resolução de 0,1 °C, demorou cerca de 40 minutos para a temperatura estabilizar, pois o sistema do banho térmico é um oscilador harmônico amortecido regulado com um algoritmo PID. Por ser um oscilador harmônico amortecido há um tempo considerável para sua estabilização.



Figura 9: Sistema do banho térmico para o ataque químico

Após o ataque químico, cada detector foi limpo com auxílio de lenços umedecidos com Xilol.

A análise de dados das exposições das seções seguintes foram feitas com 100 fotos de cada região/detector expostos com uma câmera CCD acoplada a um microscópio óptico, com ampliação: ocular de 10X e objetiva de 100X através do software EasyGrab, sistema operacional Windows XP.

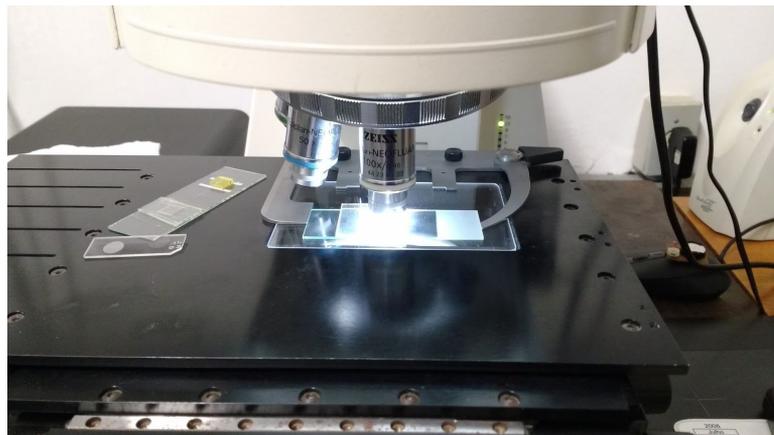


Figura 9: Microscópio Óptico com leitura



Figura 10:Microscópio Óptico com câmera CCD acoplada em sua parte superior

A análise de dados foi feita através de um script desenvolvido pelo Arnaldo Luis Lixandrão Filho (co-orientador) que leva em consideração os diâmetros e níveis de cinza para obter uma correlação destas quantidades e energias das partículas simuladas pelo SRIM.

Através da variação sistemática, obtivemos dois histogramas para cada detector: níveis de cinza (opacidade) e a distribuição de áreas.

Alpha Track Automatic Measurement



Figura 11: Script com parâmetros ajustáveis para obter o histograma de área.

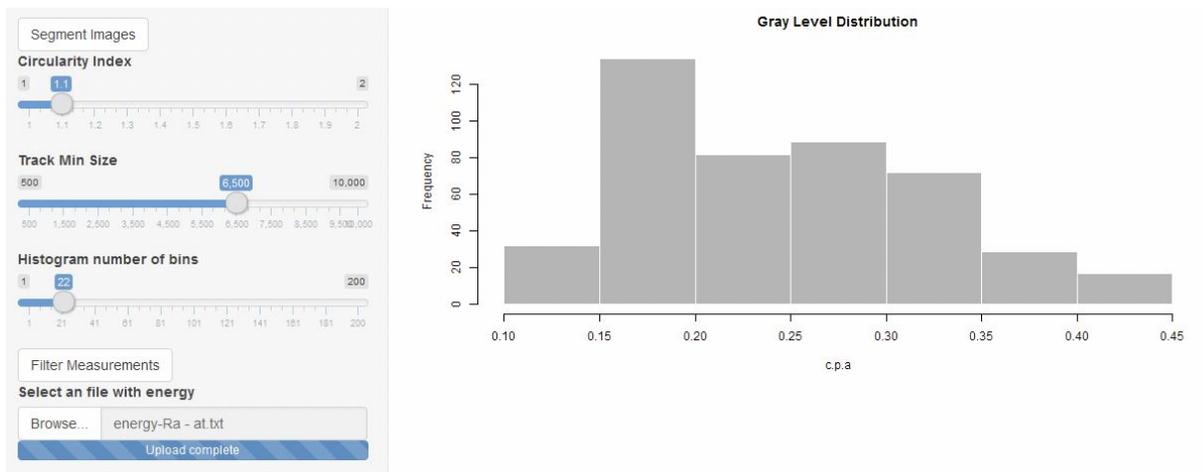


Figura 12: Teste do script para nível de cinza, opacidade.

PLANEJAMENTO DE EXPOSIÇÕES:

Utilizamos a Tabela 1 para planejar o número de exposições e a distância entre a fonte e o detector. Sendo assim planejamos 7 irradiações com as respectivas distâncias da fonte: 0 cm, 0,5 cm; 1 cm; 1,5 cm; 2,5 cm; 3 cm; 3,5 cm.

Todas as medidas foram feitas por uma régua apoiada no curso da figura 4.

O detector foi fixado em um suporte de poliestireno e sua distância até a régua foi de 1,5cm. Infelizmente, não levei em consideração a distância da fonte até a régua no curso, ou seja, nos três últimos detectores irradiados (2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm que na verdade são 4 cm, 4,5 cm, 5 cm) verifiquei no máximo quatro partículas alfa. Esse resultado é previsto na simulação feita no SRIM, pois a partícula alfa tem um alcance de no máximo 4 cm no ar. Porém para a calibração apresentada na seção DISCUSSÃO, desprezei esses detectores.

Como não tínhamos nenhuma referência para o tempo de exposição da fonte para cada distância de detector fizemos um teste (V0), levando em consideração a distância da fonte até a régua de medição já no curso do sistema: Irradiamos um CR-39 em 4 regiões, já incluindo a distância total - Região 1 (3cm durante 45s), Região 2 (3,5 cm durante 60s), Região 3 (2,5 cm durante 30s), Região 4 (1cm durante 8s). Após as 4 irradiações preparamos o ataque de NaOH, 6,25N a uma temperatura de 70 °C por 100 minutos.

O protocolo de ataque químico convencional é de 400 minutos, mas como estávamos fazendo um teste e queríamos ver se as partículas alfa realmente seriam detectadas e qual a fluência delas em cada região, fizemos um ataque reduzido de 100 minutos.

Para análise do CR-39 teste (V0) utilizamos o microscópio Zeiss Axioplan 2 acoplado a uma câmera CCD através de um software descrito na seção ATAQUE QUÍMICO E MÉTODO DE ANÁLISE. Em uma das oculares existe uma grade para leitura através dela contei a fluência, traços por grade, de 10 grades por região do CR-39.

Com a finalidade de facilitar a contagem de medida final, para um traço não se sobrepor ao outro, tentei manter a fluência de 4 partículas alfa por grade e através de uma primeira aproximação linear obtive o seguinte planejamento experimental:

Distância do detector (cm)	Tempo de exposição (segundos)	Energia simulada(MeV)
1,5 ± 0,2	8	4,4 ± 0,2
2,0 ± 0,2	40	3,9 ± 0,2
2,5 ± 0,2	52	3,3 ± 0,2
3,0 ± 0,2	65	2,6 ± 0,2
3,5 ± 0,2	60	1,8 ± 0,2
4,0 ± 0,2	162	0,8 ± 0,2
4,5 ± 0,2	190	
5 ± 0,2	226	

Tabela 2: Planejamento de distância e tempo de exposição depois de expor um detector teste

RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Analisando a imagem do detector teste (V0), vimos que na região 4 tínhamos imagens com traços definitivos de partículas alfa que não eram círculos, tinham formato de elipsóides.

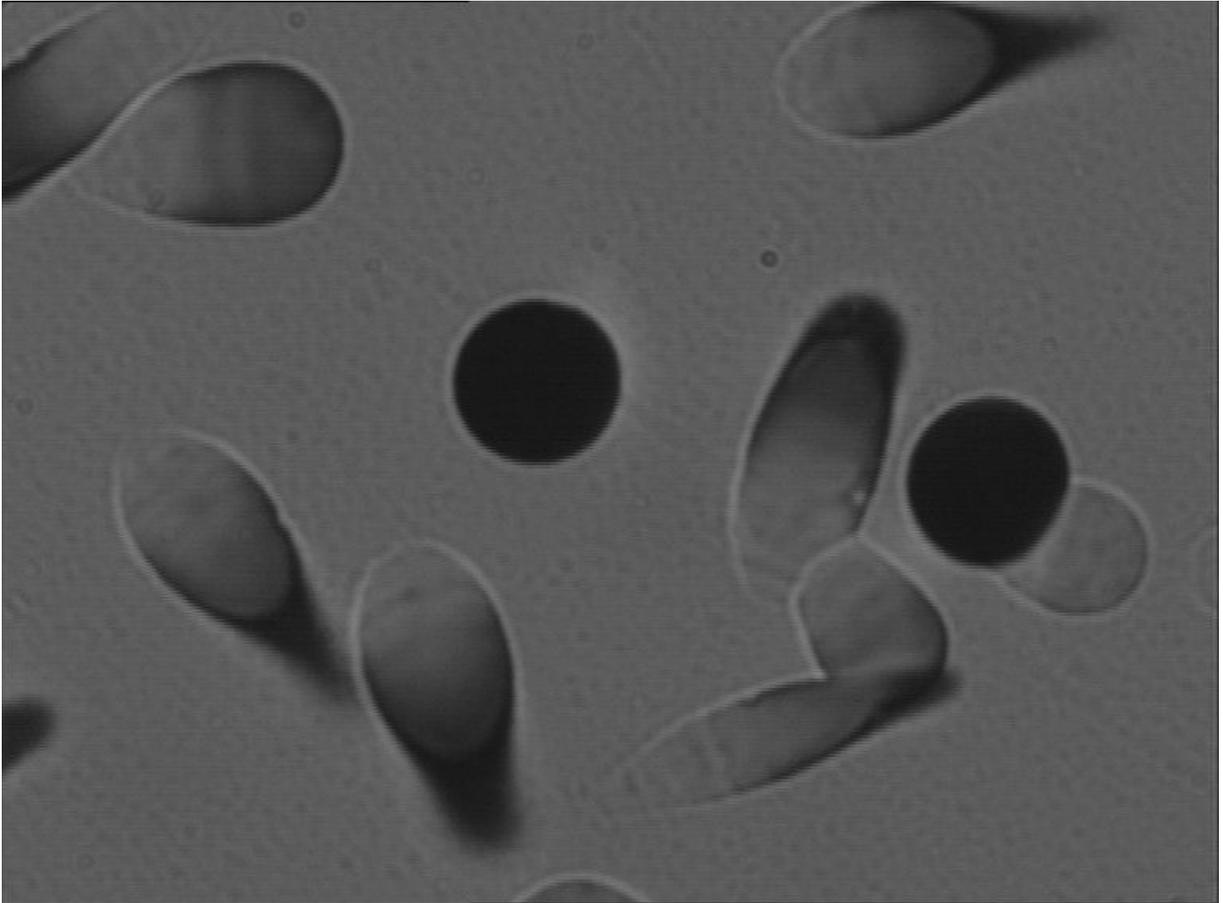


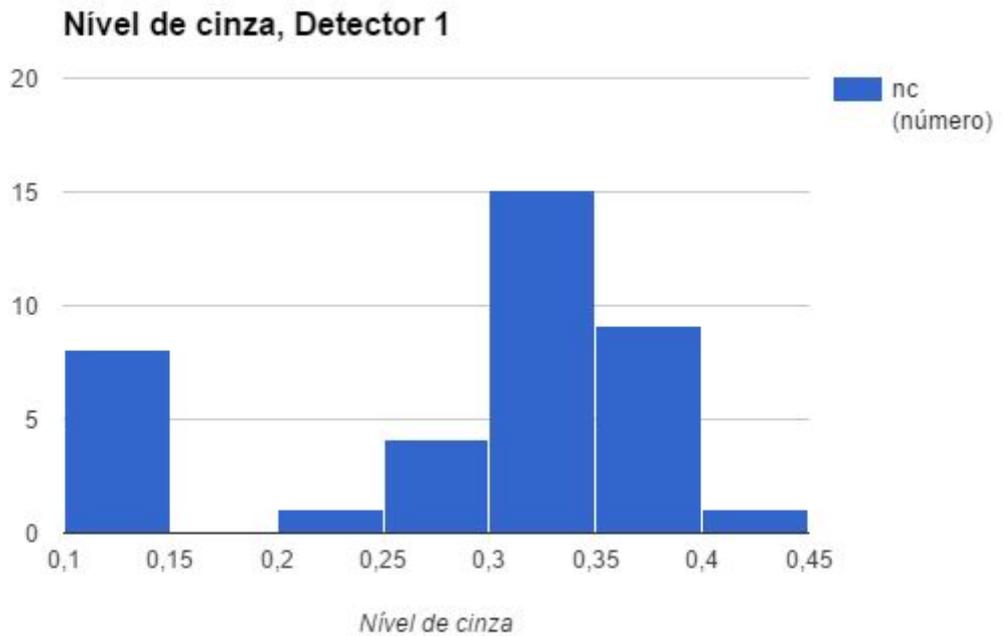
Figura 13: Traços de partículas alfa no detector, CR-39, teste (V0), com tempo de exposição de 8s a 1 cm da fonte radioativa Am-241.

Ao todo foram 500 fotos tiradas, de 5 detectores diferentes foram utilizadas na calibração software de análise. O Script do software mediu o tamanho dos traços (áreas) e níveis de cinza (opacidade), histogramas para cada CR-39.

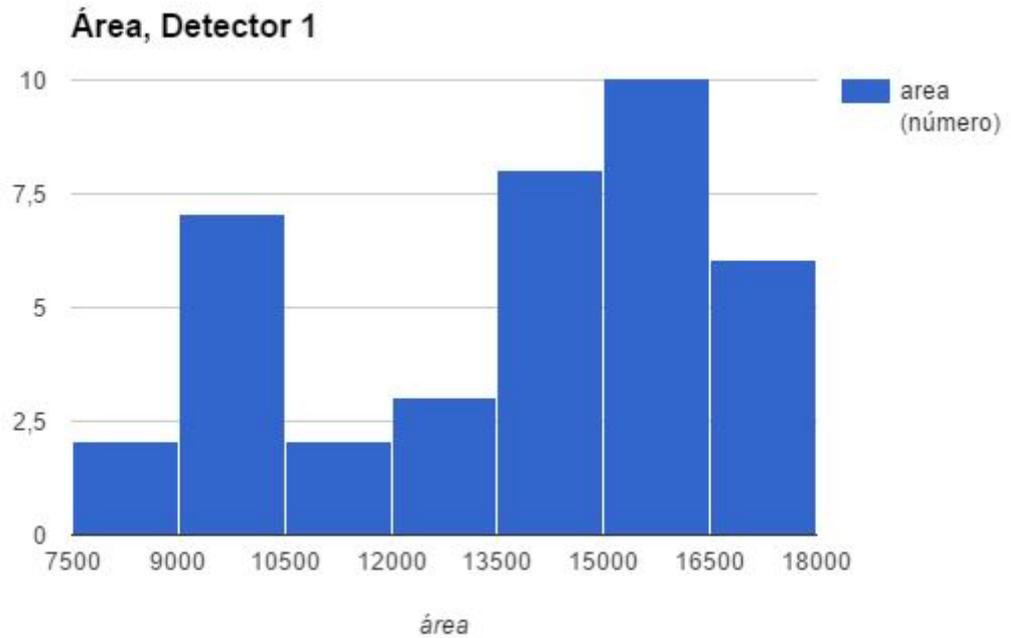
Todas as unidade de área estão em pixel ao quadrado.

Detector 1

(1,5 ± 0,2) cm da fonte	8 segundos	(4,4 ± 0,1) MeV- simulação
-------------------------	------------	----------------------------



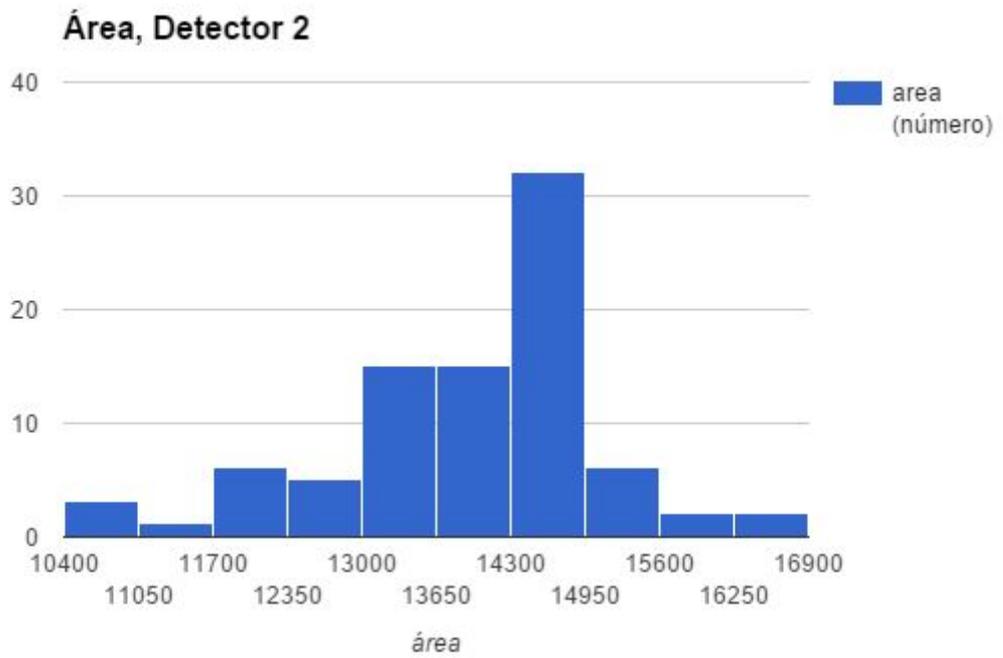
Nível de cinza médio: $(0,29 \pm 0,09)$



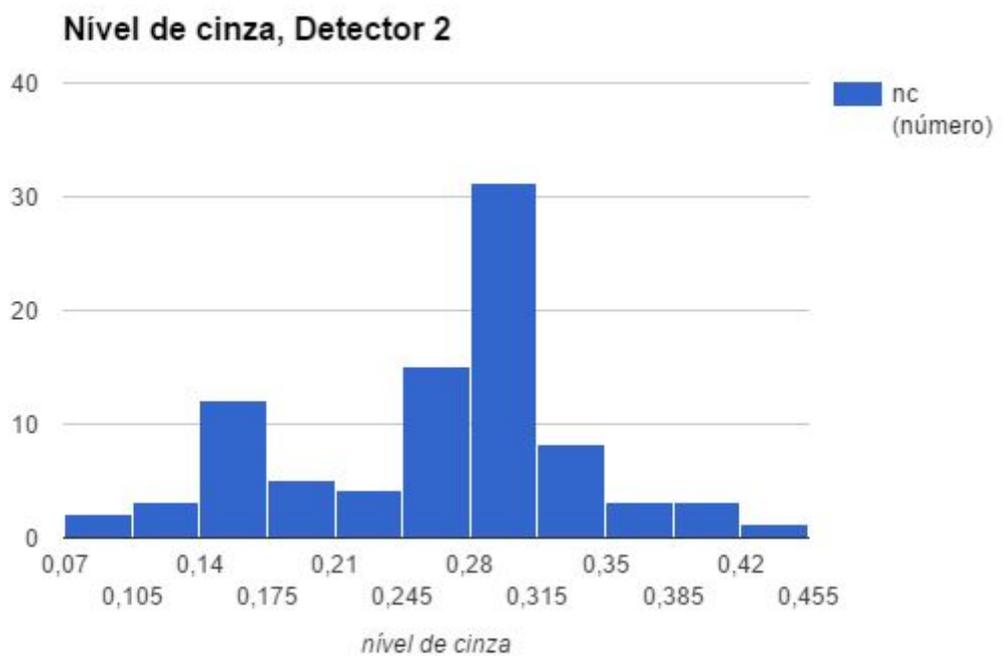
Área média: $(14 \pm 3) 10^3 \text{ pixel}^2$

Detector 2

$(2,0 \pm 0,2)$ cm da fonte	40 segundos	$(3,9 \pm 0,1)$ MeV - simulação
-----------------------------	-------------	---------------------------------



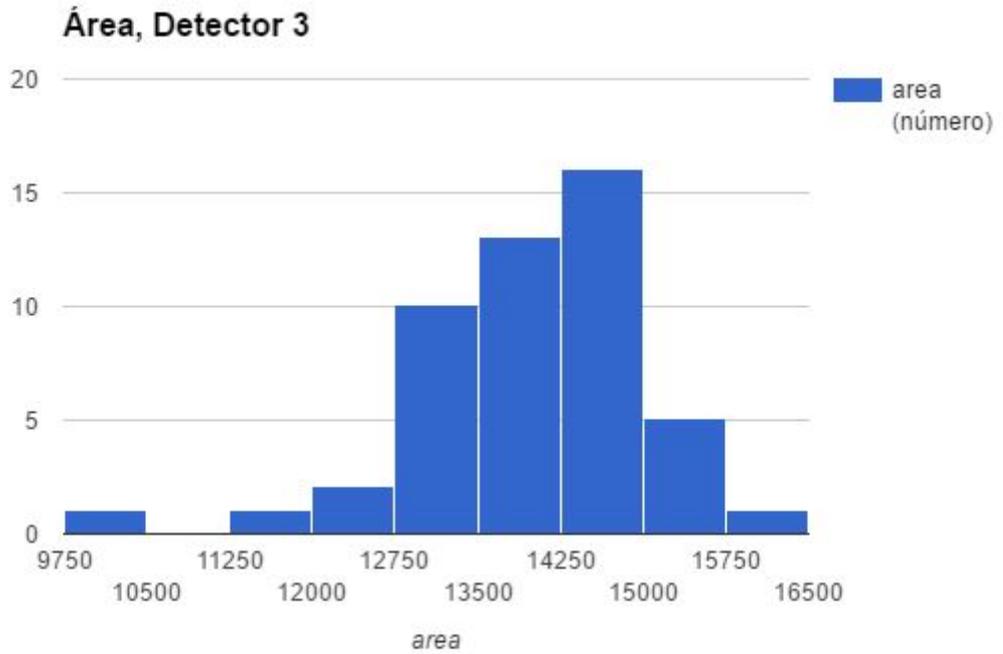
Área média: $(14 \pm 1) 10^3 \text{ pixel}^2$



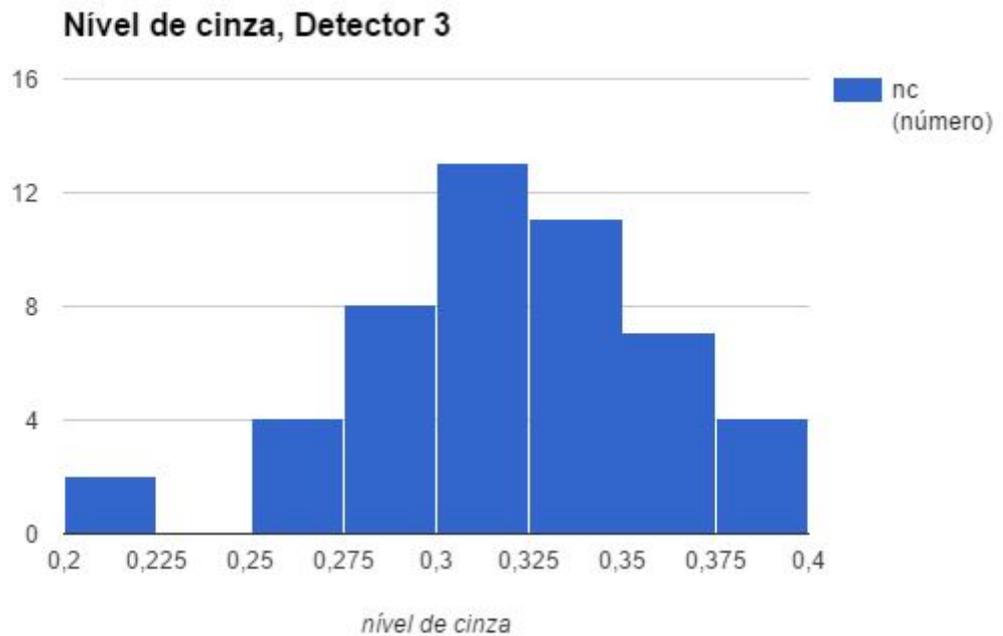
Nível de cinza: $(0,26 \pm 0,05)$

Detector 3

$(2,5 \pm 0,2)$ cm da fonte	52 segundos	$(3,3 \pm 0,1)$ MeV - simulação
-----------------------------	-------------	---------------------------------



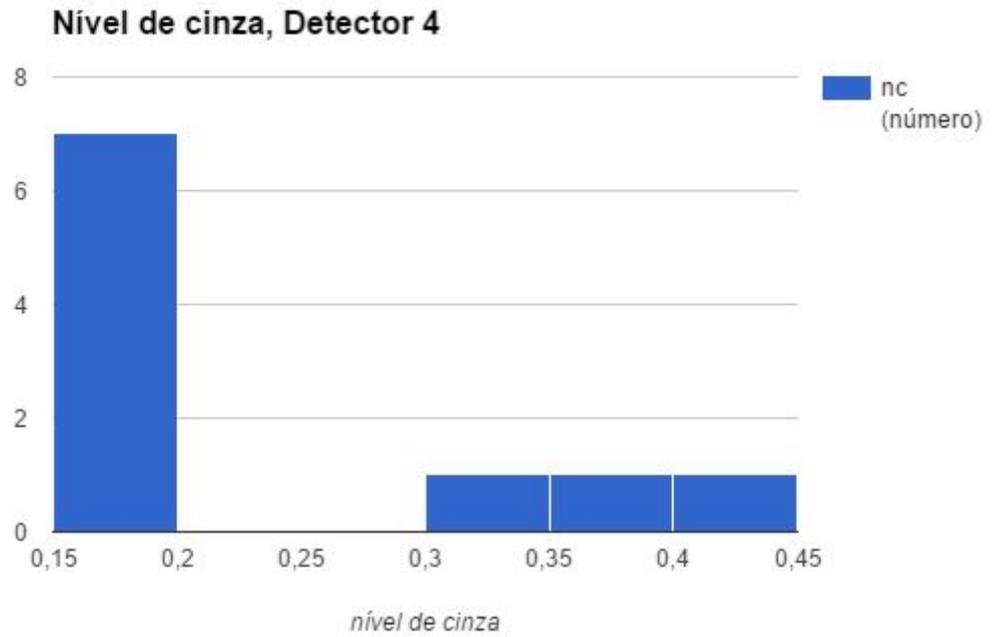
Área média: $(14 \pm 1) 10^3 \text{ pixel}^2$



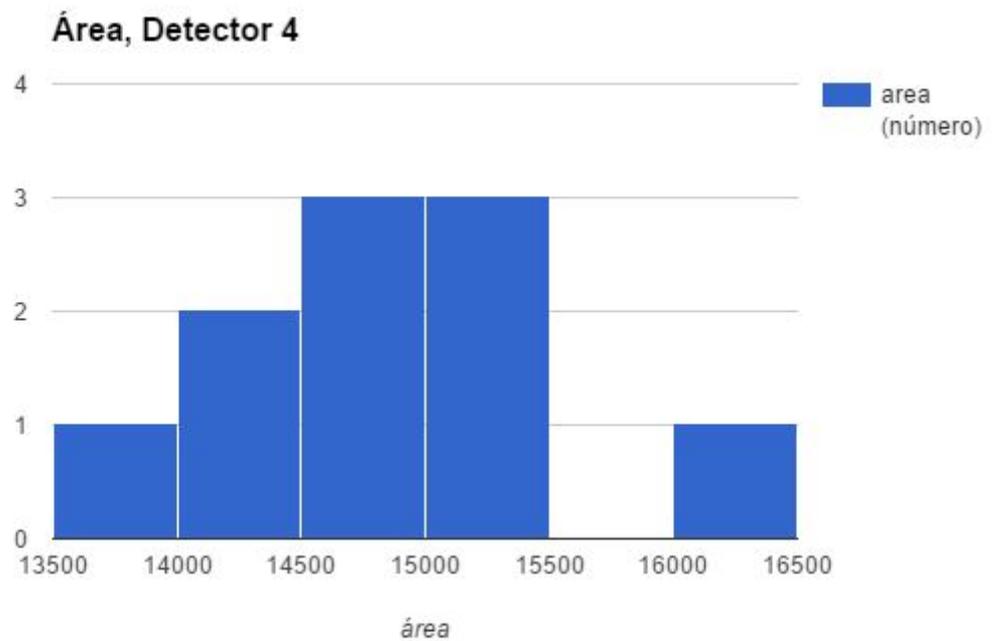
Nível de cinza: $(0,32 \pm 0,05)$

Detector 4

$(3,0 \pm 0,2)$ cm da fonte	65 segundos	$(2,6 \pm 0,2)$ MeV - simulação
-----------------------------	-------------	---------------------------------



Nível de cinza: $(0,23 \pm 0,05)$

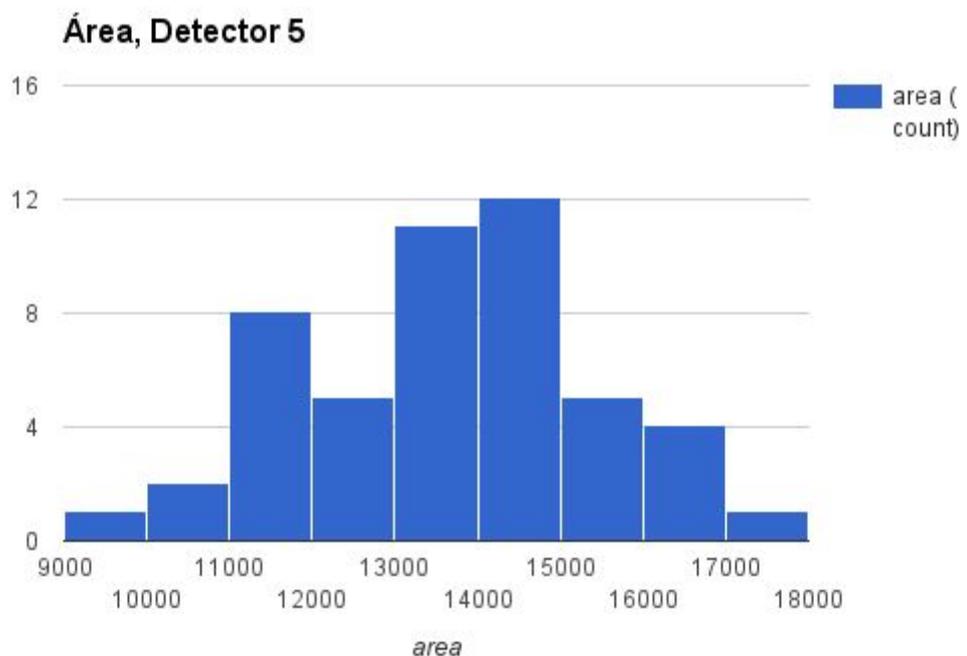


Área média: $(14 \pm 7) 10^3 \text{ pixel}^2$

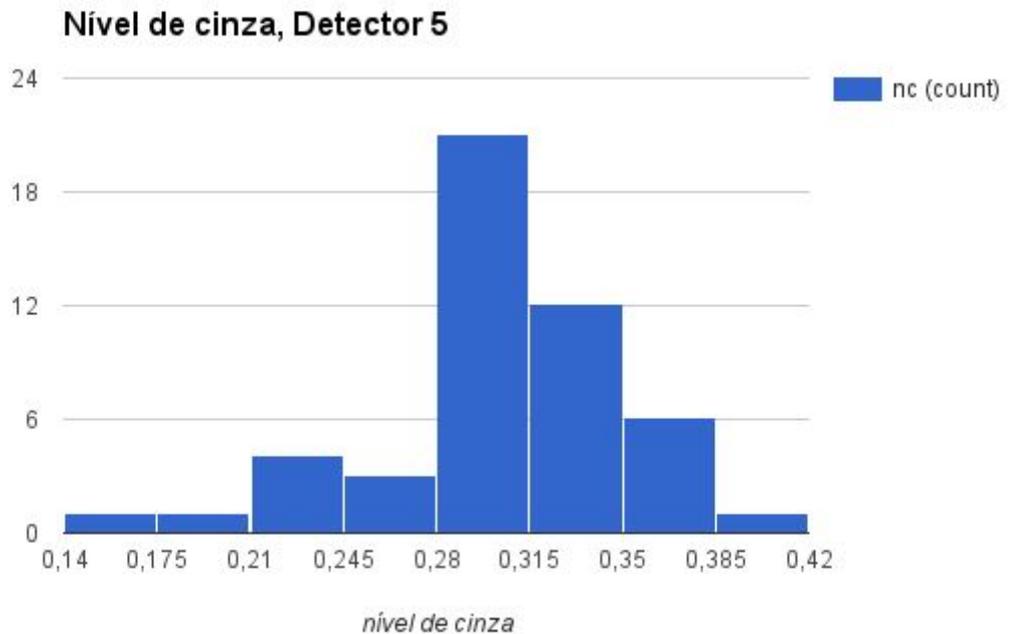
Em particular para o Detector 4, o script selecionou apenas 10 fotos das 100 tiradas. O número de traços redondos que o script detectou foi baixo para esse Detector, 3 cm de distância da fonte. Uma perspectiva futura é de adaptar o script para melhorar a eficiência da captura de traços redondos, pois tiramos muitas fotos de traços redondos e a eficiência, nesse caso, está muito baixa. Entretanto tivemos uma energia dentro do erro estipulado. Em âmbito de Instrumentação o processo de adequar e implementar código é frequente.

Detector 5

$(3,5 \pm 0,2)$ cm da fonte	60 segundos	$(1,8 \pm 0,2)$ MeV - simulação
-----------------------------	-------------	---------------------------------



Área Média: $(13 \pm 2) 10^3 \text{ pixel}^2$



Nível de cinza: $(0,30 \pm 0,05)$

DISCUSSÃO

O experimento foi realizado com 7 detectores separados e um detector de teste inicial. Como citado na seção PLANEJAMENTO DE EXPOSIÇÕES, observamos que 3 detectores dos 7 separados não continham traços por estarem acima do alcance da partícula alfa no ar. Assim, utilizamos duas regiões do detector teste inicial Região 2, Região 4. Como o detector teste foi irradiado em várias seções é provável que tenha havido contaminação de uma irradiação com a outra, por estarem em distâncias diferentes as energias mesclaram-se. Um aperfeiçoamento para um trabalho futuro poderá ser feito a partir de uma máscara de qualquer material que barre as partículas alfa; por exemplo, uma folha de alumínio, delimitando a região de irradiação.

Para planejamento do experimento na figura 13, detector teste, verificamos traços que pareciam elipsóides (na posição mais próxima a fonte radioativa) e eles sumiram em diferentes regiões do detector teste, pois para cada região irradiou-se o AM-247 em uma distância diferente. Esse foi o primeiro indício que a montagem

experimental para detectar partículas alfa funciona. Para o detector próximo à fonte radioativa temos traços de partículas alfa com diferentes ângulos sólidos comparados com detectores longe da fonte. Perto da fonte verificamos cones oblíquos, não temos um círculo perfeito (elipsóide) e temos uma sombra comprovando o cone oblíquo formado. Em distâncias mais longínquas da fonte só detectamos traços redondos, pois as partículas alfa tendem a incidir paralelamente ao detector.

Portanto, quando o detector é posicionado em uma distância maior esses elipsóides simplesmente desaparecem, verificando assim a hipótese de ângulo sólido para partículas alfa em detectores PADC.

A opacidade, tom de cinza, não interferiu na análise pois precisaríamos de uma energia menor, da ordem de 2 MeV para surtir algum efeito. Como não obtivemos dados perceptíveis, não observamos grande quantidades de alfa, com o detector mais distante da fonte, energia simulada de 2 MeV. Então não consideramos o tom de cinza. A partir de 2,0 MeV somente o tamanho dos traços (áreas) foi levado em consideração.

Uma tabela comparativa entre os valores obtidos pela calibração da Iniciação Científica anterior e a nossa instrumentação com valores simulados do SRIM:

Número de Detector	Distância do detector (cm)	Tempo de exposição (segundos)	Energia simulada pelo SRIM (MeV)	Nível de Cinza	Área Média($pixel^2$)
1	$1,5 \pm 0,2$	8	$4,4 \pm 0,2$	$0,29 \pm 0,09$	$(14 \pm 3) 10^3$
2	$2,0 \pm 0,2$	40	$3,9 \pm 0,2$	$0,26 \pm 0,05$	$(14 \pm 1) 10^3$
3	$2,5 \pm 0,2$	52	$3,3 \pm 0,2$	$0,32 \pm 0,05$	$(14 \pm 1) 10^3$
4	$3,0 \pm 0,2$	65	$2,6 \pm 0,2$	$0,23 \pm 0,05$	$(14 \pm 7) 10^3$
5	$3,5 \pm 0,2$	60	$1,8 \pm 0,2$	$0,30 \pm 0,05$	$(13 \pm 2) 10^3$

Tabela 3: Tabela comparativa entre energias experimentais, obtidas pela calibração, e energias simuladas pelo SRIM.

Para melhorar a resolução das medidas de áreas associadas a energia simulada é preciso medir mais traços para definir melhor o histograma

O histograma do Detector 4 de 2,6 MeV foi gerado pelo Script e o número de traços redondos de alfas foi 10% selecionado pelo Script, o que futuras investigações possam arrumar o Script para que isso não ocorra novamente.

PERSPECTIVAS FUTURAS

- Encontrar um método para otimizar, melhorar e padronizar a captura de fotos para maior eficiência na detecção das imagens.
- Adaptar o Script em R feito pelo Arnaldo para melhor eficiência no tratamento das fotos tiradas pela câmera CCD acoplada ao microscópio óptico. Focando principalmente em reconhecer traços redondos de partícula alfa.
- Adaptar o sistema de curso com ajuste do motor de passo a fim de medir as distâncias entre o detector e a fonte através da contagem de passo e automatizar o processo do curso.
- Coletar mais fotos e dados para obter-se uma melhor calibração.

CONCLUSÃO

Como planejado, construímos o dispositivo que consistiu em uma montagem a partir do desmonte de uma impressora e peças disponíveis no Laboratório do Grupo de Cronologia do DRCC. Planejamos as distâncias de irradiação da fonte de Am-241 e calibramos o sistema. Calibramos o sistema para testes de diferentes elementos radioativos com distância de até 4 cm, aproximadamente.

OPINIÃO DO ORIENTADOR

Ará construiu uma montagem experimental para calibrar detectores de partículas alfa para espectrometria de partículas alfa. Com a ajuda principalmente do co-orientador, encontrou uma solução criativa a partir de uma impressora que já não era mais usada. Fez um primeiro teste, expondo o detector a partículas alfa. Embora o teste não tenha sido inteiramente bem sucedido, foi importante para mostrar ajustes que precisam ser feitos ao projeto inicial e ao método de trabalho utilizado. Considero muito bom o desempenho do Ará neste projeto.

COMENTÁRIOS FINAIS

Expus meu trabalho de instrumentação desde relatório final no CaC (Consulta à Comunidade) promovida e realizada pelo professor José Joaquín Lunazzi

APÊNDICE

Para outras energias, o SRIM possui o módulo de “Ion Stopping and Range Tables” onde podemos simular para várias energias da partícula incidente, o seu alcance, dE/dx (“Stopping Power”), sua dispersão lateral e longitudinal entre outras simulações.

Para reprodução da simulação no SRIM, abaixo temos a entrada (“input”) do módulo “Ion Stopping and Range Tables” que foi simulado e a tabela com os diversos valores de energia e alcances

Ion Stopping and Range Tables

Symbol	Name	Atomic Number	Mass (amu)	Ion Energy Range (keV) Lowest	Ion Energy Range (keV) Highest
PT He	Helium	2	4,003	10	10000

Target

Target Description: Helium in O- N-Ar
Density (g/cm3): 00,00125
Gas Target:

Buttons: Add Element, Compound Dictionary, Restore Last Target

Delete Element	Symbol	Name	Atomic Number	Weight (amu)	Stoich	Atom %
X	PT O	Oxygen	8	16	0,23	23,00
X	PT N	Nitrogen	7	14	0,76	76,00
X	PT Ar	Argon	18	36	0,01	01,00

Stopping Power Units: MeV / (mg/cm2)

Compound Correction: ? 1

Buttons: Calculate Table, Clear All, Main Menu, Quit, Problem Solving

Figura 6: Parâmetros de entrada do software “SRIM” - “Ion Stopping and Range Tables” com a tela inicial “Setup”

SRIM version ---> SRIM-2013.00
 Calc. date ---> outubro 13, 2016

Disk File Name = SRIM Outputs\Helium in O- N-Ar (gas).txt

Ion = Helium [2] , Mass = 4,003 amu

Target Density = 1,2500E-03 g/cm3 = 5,1277E+19 atoms/cm3

Target is a GAS

=====
 Target Composition =====

Atom Name	Atom Numb	Atomic Percent	Mass Percent
O	8	023,00	024,99
N	7	076,00	072,30
Ar	18	001,00	002,71

=====
 Bragg Correction = 0,00%

Stopping Units = MeV / (mg/cm2)

See bottom of Table for other Stopping units

Energy	Elec.	Nuclear	Range	Straggling	Straggling
10,00 keV	3,148E-01	6,090E-02	173,76 um	71,99 um	62,90 um
11,00 keV	3,302E-01	5,778E-02	190,03 um	75,98 um	67,19 um
12,00 keV	3,449E-01	5,502E-02	206,04 um	79,70 um	71,26 um
13,00 keV	3,590E-01	5,255E-02	221,79 um	83,17 um	75,14 um
14,00 keV	3,725E-01	5,033E-02	237,29 um	86,42 um	78,85 um
15,00 keV	3,856E-01	4,831E-02	252,55 um	89,48 um	82,39 um
16,00 keV	3,982E-01	4,647E-02	267,57 um	92,35 um	85,78 um
17,00 keV	4,105E-01	4,479E-02	282,36 um	95,06 um	89,03 um
18,00 keV	4,224E-01	4,324E-02	296,94 um	97,63 um	92,15 um
20,00 keV	4,453E-01	4,049E-02	325,46 um	102,38 um	98,04 um
22,50 keV	4,723E-01	3,757E-02	360,01 um	107,70 um	104,83 um
25,00 keV	4,979E-01	3,509E-02	393,44 um	112,43 um	111,06 um
27,50 keV	5,223E-01	3,296E-02	425,83 um	116,68 um	116,80 um
30,00 keV	5,455E-01	3,110E-02	457,27 um	120,53 um	122,13 um
32,50 keV	5,679E-01	2,947E-02	487,83 um	124,03 um	127,09 um
35,00 keV	5,893E-01	2,802E-02	517,58 um	127,23 um	131,73 um
37,50 keV	6,101E-01	2,672E-02	546,58 um	130,17 um	136,08 um
40,00 keV	6,301E-01	2,555E-02	574,88 um	132,89 um	140,18 um
45,00 keV	6,684E-01	2,353E-02	629,57 um	137,83 um	147,71 um
50,00 keV	7,047E-01	2,184E-02	681,95 um	142,14 um	154,48 um

55,00 keV	7,391E-01	2,040E-02	732,30 um	145,94 um	160,62 um
60,00 keV	7,720E-01	1,915E-02	780,83 um	149,31 um	166,23 um
65,00 keV	8,034E-01	1,807E-02	827,72 um	152,35 um	171,38 um
70,00 keV	8,337E-01	1,711E-02	873,13 um	155,09 um	176,14 um
80,00 keV	8,908E-01	1,550E-02	960,02 um	160,07 um	184,68 um
90,00 keV	9,442E-01	1,420E-02	1,04 mm	164,29 um	192,16 um
100,00 keV	9,942E-01	1,311E-02	1,12 mm	167,92 um	198,78 um
110,00 keV	1,041E+00	1,220E-02	1,20 mm	171,09 um	204,72 um
120,00 keV	1,086E+00	1,141E-02	1,27 mm	173,89 um	210,09 um
130,00 keV	1,128E+00	1,073E-02	1,34 mm	176,39 um	214,98 um
140,00 keV	1,169E+00	1,013E-02	1,41 mm	178,64 um	219,48 um
150,00 keV	1,207E+00	9,604E-03	1,47 mm	180,69 um	223,62 um
160,00 keV	1,244E+00	9,133E-03	1,53 mm	182,56 um	227,46 um
170,00 keV	1,280E+00	8,710E-03	1,60 mm	184,27 um	231,04 um
180,00 keV	1,314E+00	8,328E-03	1,66 mm	185,86 um	234,40 um
200,00 keV	1,378E+00	7,663E-03	1,77 mm	189,04 um	240,50 um
225,00 keV	1,451E+00	6,979E-03	1,91 mm	192,68 um	247,23 um
250,00 keV	1,518E+00	6,416E-03	2,04 mm	195,83 um	253,16 um
275,00 keV	1,579E+00	5,944E-03	2,17 mm	198,60 um	258,47 um
300,00 keV	1,634E+00	5,541E-03	2,29 mm	201,09 um	263,26 um
325,00 keV	1,684E+00	5,194E-03	2,41 mm	203,34 um	267,64 um
350,00 keV	1,728E+00	4,891E-03	2,53 mm	205,40 um	271,67 um
375,00 keV	1,768E+00	4,624E-03	2,64 mm	207,30 um	275,41 um
400,00 keV	1,804E+00	4,386E-03	2,75 mm	209,07 um	278,90 um
450,00 keV	1,864E+00	3,983E-03	2,97 mm	213,38 um	285,28 um
500,00 keV	1,908E+00	3,652E-03	3,18 mm	217,28 um	291,02 um
550,00 keV	1,941E+00	3,375E-03	3,38 mm	220,88 um	296,27 um
600,00 keV	1,962E+00	3,140E-03	3,59 mm	224,26 um	301,15 um
650,00 keV	1,973E+00	2,938E-03	3,79 mm	227,47 um	305,73 um
700,00 keV	1,976E+00	2,762E-03	3,99 mm	230,56 um	310,08 um
800,00 keV	1,962E+00	2,470E-03	4,40 mm	239,93 um	318,27 um
900,00 keV	1,930E+00	2,238E-03	4,81 mm	249,01 um	326,00 um
1,00 MeV	1,884E+00	2,048E-03	5,22 mm	258,02 um	333,45 um
1,10 MeV	1,832E+00	1,889E-03	5,65 mm	267,08 um	340,75 um
1,20 MeV	1,776E+00	1,755E-03	6,10 mm	276,28 um	348,00 um
1,30 MeV	1,719E+00	1,639E-03	6,55 mm	285,69 um	355,27 um
1,40 MeV	1,663E+00	1,539E-03	7,02 mm	295,36 um	362,61 um
1,50 MeV	1,609E+00	1,451E-03	7,51 mm	305,30 um	370,06 um
1,60 MeV	1,557E+00	1,373E-03	8,02 mm	315,53 um	377,66 um

1,70 MeV	1,507E+00	1,304E-03	8,54 mm	326,07 um	385,43 um
1,80 MeV	1,461E+00	1,242E-03	9,08 mm	336,90 um	393,39 um
2,00 MeV	1,376E+00	1,134E-03	10,20 mm	376,66 um	409,96 um
2,25 MeV	1,284E+00	1,025E-03	11,70 mm	437,29 um	432,00 um
2,50 MeV	1,204E+00	9,358E-04	13,31 mm	497,62 um	455,63 um
2,75 MeV	1,135E+00	8,618E-04	15,02 mm	558,07 um	480,94 um
3,00 MeV	1,075E+00	7,992E-04	16,83 mm	618,89 um	507,94 um
3,25 MeV	1,021E+00	7,456E-04	18,73 mm	680,22 um	536,67 um
3,50 MeV	9,735E-01	6,990E-04	20,74 mm	742,15 um	567,11 um
3,75 MeV	9,306E-01	6,583E-04	22,84 mm	804,75 um	599,26 um
4,00 MeV	8,918E-01	6,223E-04	25,03 mm	868,06 um	633,10 um
4,50 MeV	8,241E-01	5,614E-04	29,69 mm	1,10 mm	705,76 um
5,00 MeV	7,668E-01	5,120E-04	34,72 mm	1,32 mm	784,89 um
5,50 MeV	7,175E-01	4,709E-04	40,10 mm	1,54 mm	870,29 um
6,00 MeV	6,746E-01	4,363E-04	45,85 mm	1,75 mm	961,79 um
6,50 MeV	6,369E-01	4,066E-04	51,94 mm	1,96 mm	1,06 mm
7,00 MeV	6,033E-01	3,810E-04	58,39 mm	2,17 mm	1,16 mm
8,00 MeV	5,463E-01	3,386E-04	72,32 mm	2,96 mm	1,39 mm
9,00 MeV	5,047E-01	3,051E-04	87,54 mm	3,68 mm	1,63 mm
10,00 MeV	4,657E-01	2,780E-04	104,03 mm	4,38 mm	1,89 mm

Multiply Stopping by for Stopping Units

1,2500E-02	eV / Angstrom
1,2500E-01	keV / micron
1,2500E-01	MeV / mm
1,0000E+00	keV / (ug/cm2)
1,0000E+00	MeV / (mg/cm2)
1,0000E+03	keV / (mg/cm2)
2,4376E+01	eV / (1E15 atoms/cm2)
2,1213E+00	L.S.S. reduced units

=====
(C) 1984,1989,1992,1998,2008 by J.P. Biersack and J.F. Ziegler

Tabela 2: Energias da partícula alfa incidente e seu alcance no ar

REFERÊNCIAS

- Ghazaly, M. El, and H.e. Hassan. "Spectroscopic Studies on Alpha Particle-irradiated PADC (CR-39 Detector)." *Results in Physics* 4 (2014): 40-43. Print.
- "INTERACTIONS OF IONS WITH MATTER." *James Ziegler*. Web. 09 Oct. 2016.
- Socolow, R.h. "Exposure to Radon and Radon Progeny in the Indoor Environment. Final Report." (1994). Print.
- Williams, W. S. C. *Nuclear and Particle Physics*. Oxford: Clarendon, 1991. Print.
- Ziegler, James F., M.d. Ziegler, and J.p. Biersack. "SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter (2010)." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268.11-12 (2010): 1818-823. Print.
- Zuniga G., A.R., 1998. Caracterização do CR-39 como espectrômetro alfa. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.