

ESTUDO ACERCA DOS NÊUTRONS SECUNDÁRIOS NO ACELERADOR BRASILEIRO SÍNCROTRON DE 4ª GERAÇÃO UTILIZANDO DETECTORES PASSIVOS

Palavras-Chave: NÊUTRONS, DETECTORES, ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Autores(as):

JOÃO VITOR DA SILVA, IFGW - UNICAMP

Prof. Dr. SANDRO GUEDES DE OLIVEIRA (orientador), IFGW - UNICAMP

ISABELA CASTRO DE MORAES (co-orientadora), CNPEM

INTRODUÇÃO

Aceleradores de partículas que produzem luz síncrotron são formados de diferentes estruturas aceleradoras nas quais elétrons atingem velocidades terminais da ordem de gigaelétron volts (GeV), como é o caso do SIRIUS, acelerador brasileiro síncrotron de 4ª geração; Nesse contexto, a perda de elétrons é um processo esperado na operação do acelerador e, devido à sua alta energia, os elétrons desviados do feixe incidem em regiões adjacentes, produzindo nêutrons, que são, por sua vez, contidos dentro da blindagem do acelerador. Detectores passivos de estado sólido, como o CR-39, compostos por $C_{12}H_{18}O_7$, e com área superficial total de $211,4\text{ mm}^2$, são empregados para quantificar as emissões de nêutrons. Os nêutrons são gerados em diferentes faixas de energia mas, devido às características do sistema de detecção que foi utilizado nesta análise, foram estudadas somente duas dessas faixas: nêutrons térmicos e nêutrons rápidos. Nêutrons térmicos podem ser descritos pela distribuição de Maxwell-Boltzmann, com uma energia média de 25 meV. Nesta classificação binária, adota-se a energia de corte de 0,5 eV para os nêutrons térmicos. Já nêutrons rápidos diferem dos nêutrons térmicos em energia, alcançando valores superiores a 1 keV.



Figura 1: Exemplo de detector CR-39

A quantificação dos nêutrons gerados desta forma é importante para fins de proteção radiológica e também pela razão de que os nêutrons secundários podem induzir reações em outros elementos, causando danos nos dispositivos do acelerador como, por exemplo, a falha de equipamentos eletrônicos, rachaduras em materiais e a desmagnetização de ímãs pela interação de radiação da operação do acelerador (Adib J. Samin, 2018).

METODOLOGIA

Inicialmente, os detectores foram posicionados em diferentes equipamentos e regiões no SIRIUS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, LNLS/CNPEM), com o propósito de se observar a possível incidência de nêutrons e sua taxa de ocorrência. Ao todo, para este projeto, foram utilizados 21 detectores CR-39, dos quais 2 detectores foram medidos no Background, ou seja, levando em conta a radiação ambiental somente. De maneira geral, os detectores foram posicionados em locais

como dipolos, quadripolos, onduladores, chicane de pessoal, absorvedores de cobre e também paredes de chumbo.

A Figura 2 abaixo exemplifica o esquema para o posicionamento dos detectores em duas diferentes regiões do acelerador.

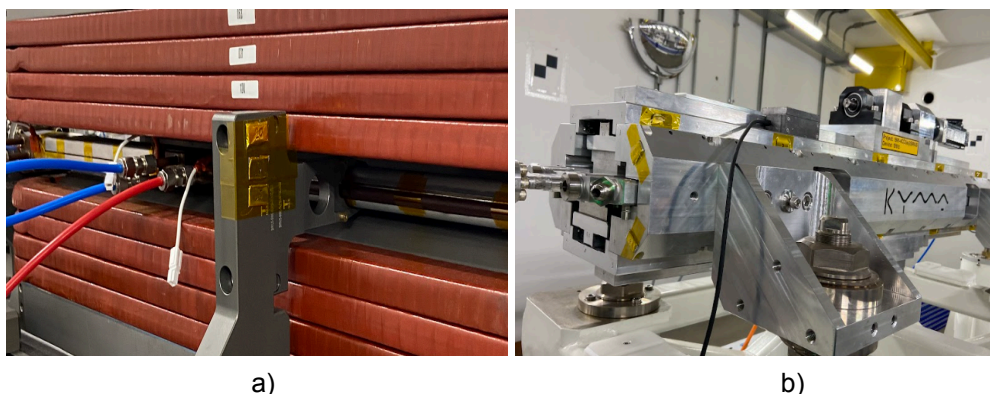


Figura 2: Esquema para o posicionamento dos detectores (em amarelo) em a) um dipolo e em b) um ondulador, dois dispositivos distintos no maquinário do acelerador.

A montagem do detector utilizada está mostrada na Figura 3. Na face indicada na figura como traseira/verso, os nêutrons rápidos espalham núcleos do próprio detector (C, O e principalmente H), que age também como conversor de nêutrons, deixando traços (Bolzonella et al., 2021). Um filme fino de boro está acoplado a uma das faces de alguns dos 21 detectores. Nessas faces, partículas α e núcleos de ${}^7\text{Li}$, provenientes da reação ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$, induzida principalmente por nêutrons térmicos, também deixam traços. O conjunto detectará interações tanto de nêutrons térmicos quanto de nêutrons rápidos. A face traseira nessa representação detecta somente nêutrons rápidos e a face em contato com o filme detecta nêutrons térmicos e rápidos. A diferença entre as densidades de traços das duas faces do detector fornece uma estimativa da fluência de nêutrons térmicos.

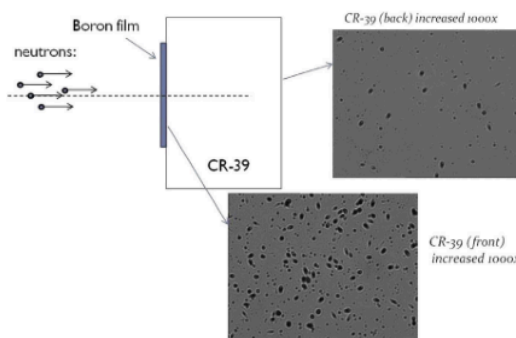


Figura 3: Montagem experimental usada durante a irradiação de nêutrons e imagens dos traços revelados após o ataque químico (Smilgys et al., 2013).

Durante a exposição dos detectores, íons carregados eletricamente interagem e quebram as

cadeias poliméricas ao longo de sua trajetória, formando o traço latente. Este traço é mais reativo a reagentes químicos apropriados que o restante do material, de forma que a região no seu entorno é corroída mais rapidamente durante o tratamento químico com NaOH (Hidróxido de Sódio, ou soda cáustica), na temperatura de 70°C, por 400 minutos em um banho térmico, formando canais cônicos que cruzam a superfície do detector. As projeções destes canais, quando vistas de cima, têm dimensões da ordem de

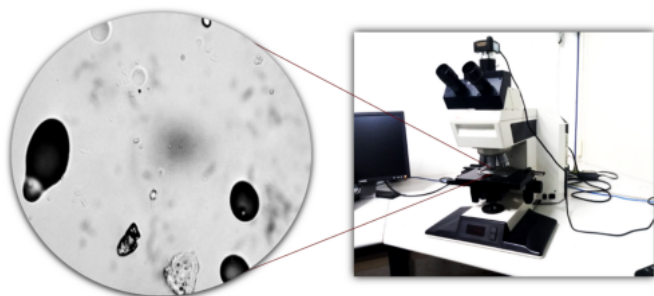


Figura 4: Esquemático da representação de visualização dos traços no detector com o microscópio óptico (Detector 5688566)

10 a 20 μm e podem ser visualizadas com um microscópio óptico em uma ampliação nominal de 630x, como representado na figura 4, o que permite sua diferenciação e contabilização.

Em cada face de cada detector, os traços foram contados manualmente em campos igualmente espaçados, com diâmetros de 0,35 mm por campo, totalizando 1099 campos em cada lado, cobrindo a maior parte possível do detector, concomitantemente, imagens das regiões analisadas foram capturadas usando uma câmera CCD acoplada ao microscópio. As imagens serão utilizadas para compor um banco de dados para uso em algoritmo de aprendizado de máquina para automação do processo de contagem.

A figura 5 exemplifica, apresentando somente um dos 21 detectores analisados, o resultado obtido das medidas tanto para a frente quanto para o seu verso. Nota-se que a distribuição espacial dos traços contabilizados segue a distribuição estatística de Poisson, mas que acaba se aproximando do limite em que a distribuição Gaussiana começa a ser caracterizada. Nesse sentido, foram gerados gráficos específicos para cada face do detector e o ajuste da distribuição de Poisson concernente, como pode ser observado nas figuras 6 e 7. A análise aqui discutida para o detector 5688566 também foi feita e estendida para os outros 20 detectores, incluindo os detectores de Background. Enfatiza-se que os detectores vão possuir dados que apresentam formas intermediárias entre o previsto no Background (contagens de traços concentradas em zero) e aqueles que possuem um número considerável de traços, como neste exemplo presente.

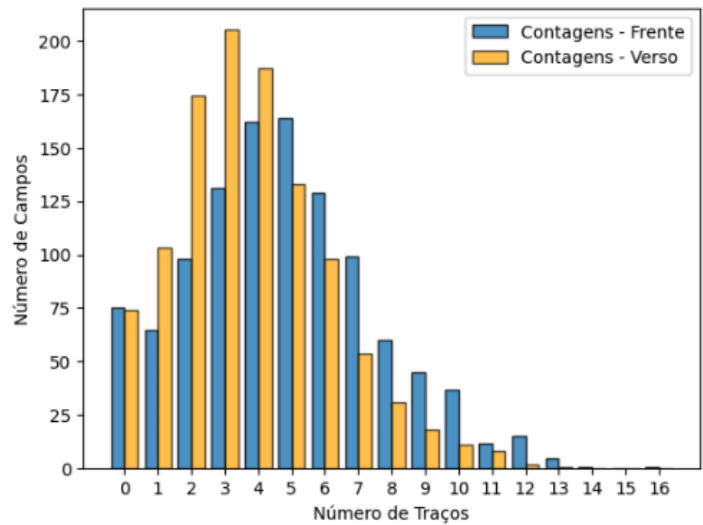


Figura 5: Distribuição da contagem de traços - Detector 5688566

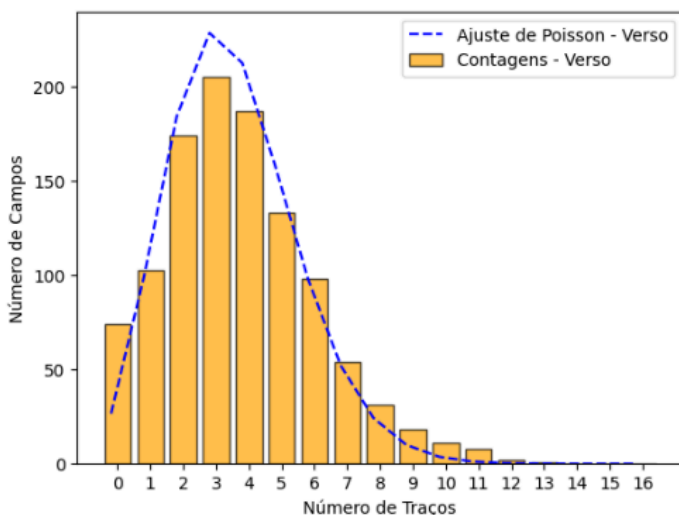


Figura 6: Distribuição da contagem de traços com ajuste de Poisson - Detector 5688566 - Verso

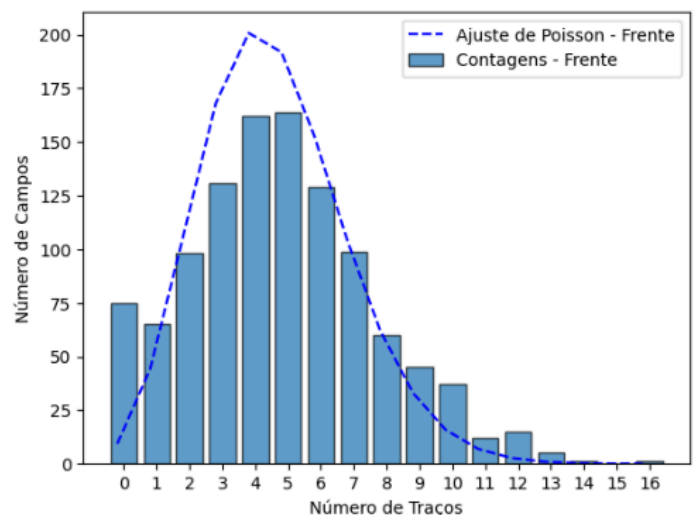


Figura 7: Distribuição da contagem de traços com ajuste de Poisson - Detector 5688566 - Frente

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante a pesquisa do aluno fornecem uma visão detalhada sobre a fuga de nêutrons em um acelerador de luz síncrotron de 4ª geração. A análise dos dados mostra que, apesar da eficácia da blindagem, há variações significativas na quantidade de nêutrons que são gerados indiretamente pelo feixe, dependendo da posição e da energia destas partículas.

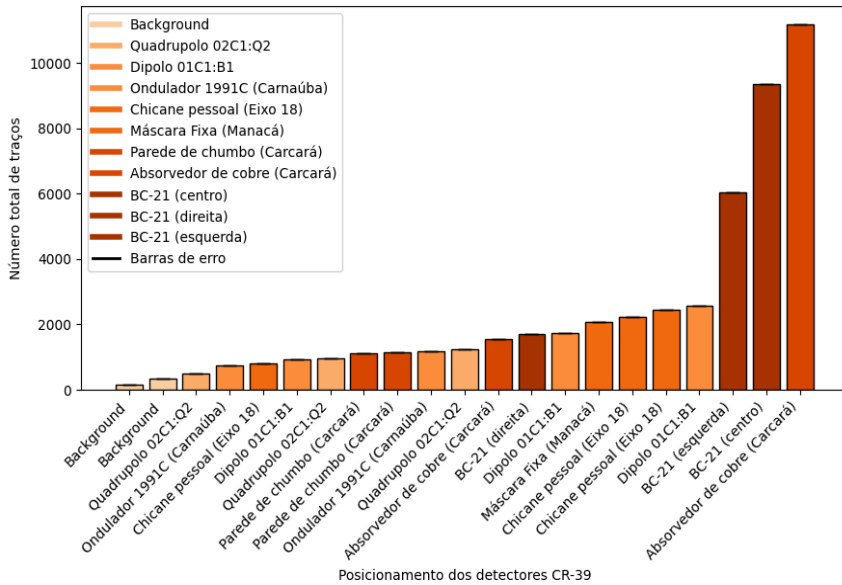


Figura 8: Distribuição da Contagem de traços por Região de posicionamento dos detectores

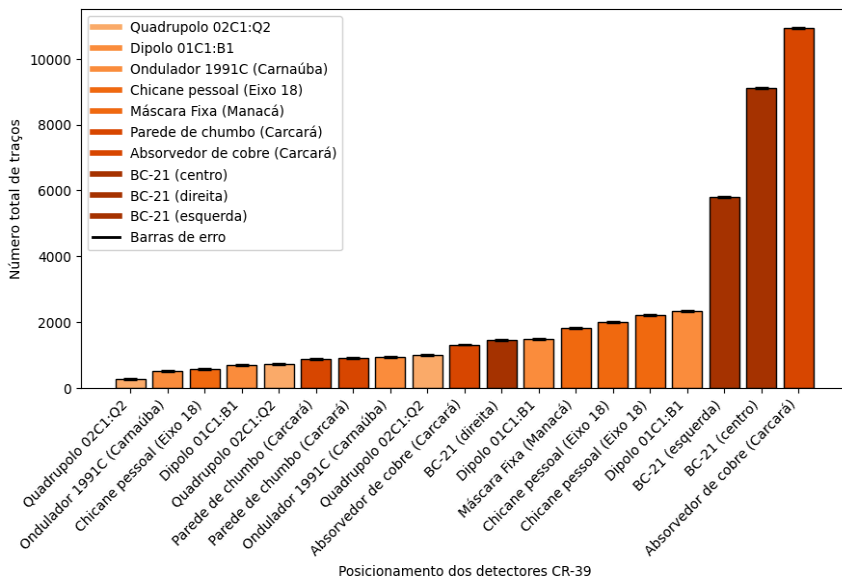


Figura 9: Distribuição da Contagem de traços por Região de posicionamento dos detectores com os valores de Background descontados

Detector	Posicionamento
5688515	Background
5688517	Background
5688567	Quadrupolo 02C1:Q2
5688568	Quadrupolo 02C1:Q2
5688401	Quadrupolo 02C1:Q2
5688566	BC-21 (centro)
5688487	BC-21 (direita)
5688373	BC-21 (esquerda)
5688541	Absorvedor de cobre (Carcará)
5688486	Absorvedor de cobre (Carcará)
5688374	Parede de chumbo (Carcará)
5688540	Parede de chumbo (Carcará)
5688516	Chicane pessoal (Eixo 18)
5688514	Chicane pessoal (Eixo 18)
5688569	Chicane pessoal (Eixo 18)
5688488	Máscara Fixa (Manacá)
5688489	Dipolo 01C1:B1
5688518	Ondulador 1991C (Carnaúba)
5688400	Ondulador 1991C (Carnaúba)
5688490	Dipolo 01C1:B1
5688542	Dipolo 01C1:B1

Tabela 1: Região de Posicionamento dos detectores no Sirius.

As figuras 8 e 9 ilustram de maneira clara e concisa as variações no número de traços de nêutrons para cada detector e a respectiva região na qual o mesmo foi alocado. Destaca-se o fato de que as contagens dos traços foram realizadas pelo aluno sem o conhecimento prévio das regiões de posicionamento dos detectores, visando não enviesar os resultados. Vale salientar também que o gráfico da figura 9 apresenta os resultados com os valores de Background descontados dos demais detectores, todavia, como foram realizadas medidas de dois detectores em Background, foi feita então a média do número de contagens de ambos para que

tal valor resultante fosse subtraído do número de contagens dos detectores restantes e, como pode ser reparado, todos os valores do número de contagens de traços nos detectores analisados são maiores que o valor medido em Background, indicando que pode haver, portanto, fuga de nêutrons nas regiões medidas. As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos pelo aluno ao realizar o estudo geral dos

dados coletados em relação ao número de contagens efetuadas e de fluência ($\frac{\text{Contagens}}{\text{Área}}$) em cada um dos detectores, assim como suas respectivas incertezas.

Detector	Número total de traços	Incerteza do Número de traços	Média	Desvio padrão
5688515	326	0,11	0,148	0,016
5688517	147	0,17	0,067	0,011
5688567	504	0,09	0,229	0,020
5688568	1244	0,06	0,566	0,030
5688401	963	0,07	0,438	0,027
5688566	9341	0,02	4,250	0,111
5688487	1702	0,05	0,774	0,038
5688373	6031	0,03	2,744	0,081
5688541	11180	0,02	5,086	0,104
5688486	1556	0,05	0,708	0,038
5688374	1157	0,06	0,527	0,032
5688540	1113	0,06	0,507	0,035
5688516	809	0,07	0,368	0,027
5688514	2459	0,04	1,119	0,045
5688569	2240	0,04	1,020	0,040
5688488	2068	0,04	0,941	0,040
5688489	924	0,07	0,421	0,034
5688518	1178	0,06	0,536	0,032
5688400	747	0,08	0,340	0,025
5688490	2575	0,04	1,172	0,044
5688542	1727	0,05	0,786	0,038

Tabela 2: Resultados obtidos após a análise dos 21 detectores

Detector	Fluência - FRENTE	Δ Fluência - FRENTE	Fluência - VERSO	Δ Fluência - VERSO	Fluência - TOTAL	Δ Fluência - TOTAL
5688515	0,339	0,001	0,335	0,001	0,337	0,001
5688517	0,135	0,001	0,168	0,001	0,152	0,002
5688567	0,517	0,001	0,525	0,001	0,521	0,001
5688568	1,489	0,000	1,084	0,000	1,287	0,001
5688401	1,241	0,000	0,751	0,001	0,996	0,001
5688566	10,863	0,002	8,461	0,002	9,662	0,003
5688487	1,922	0,001	1,599	0,000	1,76	0,001
5688373	6,986	0,002	5,49	0,001	6,238	0,002
5688541	10,554	0,002	12,573	0,003	11,564	0,004
5688486	1,326	0,000	1,893	0,001	1,609	0,001
5688374	1,059	0,000	1,334	0,000	1,197	0,001
5688540	1,442	0,000	0,861	0,000	1,151	0,001
5688516	0,823	0,001	0,85	0,001	0,837	0,001
5688514	2,803	0,001	2,284	0,001	2,543	0,001
5688569	2,213	0,001	2,42	0,001	2,317	0,001
5688488	1,816	0,001	2,462	0,001	2,139	0,001
5688489	0,813	0,001	1,098	0,000	0,956	0,001
5688518	1,254	0,000	1,183	0,000	1,218	0,001
5688400	1,09	0,000	0,455	0,001	0,773	0,001
5688490	2,772	0,001	2,555	0,001	2,663	0,001
5688542	2,311	0,001	1,262	0,000	1,786	0,001

Tabela 3: Valores de fluência calculados para cada detector, assim como suas incertezas (Δ Fluência)

CONCLUSÕES

Podemos concluir que os resultados obtidos no projeto fornecem uma visão abrangente e detalhada sobre a fuga de nêutrons em um acelerador de luz síncrotron como o SIRIUS. A análise rigorosa dos dados coletados revela aspectos cruciais do comportamento dos nêutrons em diferentes condições dentro da blindagem do acelerador. Dessa maneira, as variações significativas na quantidade de nêutrons que escapam, influenciadas pela posição dos detectores e pela energia dos nêutrons, destacam áreas críticas para melhorias na blindagem nas regiões de maior atividade, além de que a aplicação de modelagem estatística oferece uma compreensão aprofundada das dinâmicas envolvidas neste estudo, permitindo então o aperfeiçoamento no design da blindagem e na operação segura do acelerador. Ademais, a construção do banco de imagens representa um avanço significativo para a implementação de técnicas de machine learning, otimizando a identificação de traços e a coleta de dados em projetos futuros. Ao abordar esses pontos, entende-se que o projeto contribui para a melhora da segurança radiológica e eficiência do acelerador brasileiro síncrotron de 4ª geração.

BIBLIOGRAFIA

- M. Bolzonella, M. Caresana, M. Ferrarini, R. Babuț, 2021. Characterization of a novel passive personal fast neutron dosimeter based on a CR-39 track detector in monochromatic neutron fields via Monte Carlo simulations and experiments. *Radiat. Meas.* 146, 106627.
- C.S. Oliveira, B. Malheiros, K.C.C. Pires, M. Assunção, S. Guedes, J.N. Corrêa, S.A. Paschuk, 2021. *Nucl. Instrum. Meth. A* 995, 165130.
- I. C. Moraes, 2018. Montagem de uma câmara de vácuo portátil para calibração de detectores de partículas carregadas. Relatório FAPESP processo # 2016/25073-9.
- A. J. Samin, 2018. *Journal of Nuclear Materials. Rev. Radiat.-Induc. Demagnetization Perm. Magn.* 503, 14.
- B. Smilgys, S. Guedes, M. Morales, F. Alvarez, J.C. Hadler, P.R.P. Coelho, P.T.D. Siqueira, I. Alencar, C.J. Soares, E.A.C. Curvo, 2013. Boron thin films and CR-39 detectors in BNCT: A method to measure the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaction rate. *Radiat. Meas.* 50, 6.
- C.J. Soares, I. Alencar, S. Guedes, R.H. Takizawa, B. Smilgys, J.C. Hadler, 2013. Alpha spectrometry study on LR 115 and Makrofol through measurements of track diameter. *Radiat. Meas.* 50, 246.