

SUBSÍDIOS PARA EMPREGO DE FONTES RADIOATIVAS AOS FINS EDUCACIONAIS: REFLEXÕES A PARTIR DE ELETRODOS DE TUNGSTÊNIO CONTENDO TÓRIO

SUBSIDIES FOR EMPLOYMENT FROM RADIOACTIVE SOURCES FOR EDUCATIONAL PURPOSES: REFLECTIONS FROM TUNGSTEN ELECTRODES CONTAINING TORIO

Osmar Henrique Moura da Silva [osmarh@uel.br]

Laboratório de Pesquisa e Instrumentação em Ensino de Física, Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina – Londrina (PR)

Neivaldo Costa [neivaldo@cena.usp.br]

Seção Técnica de Proteção Radiológica do Cena/USP – Piracicaba (SP)

Paulo Rogério Catarini da Silva [prcsilva@uel.br]

Laboratório de Filmes Finos do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina – Londrina (PR)

Fábio Lopes [fabiolopes@uel.br]

Laboratório de Física Nuclear do Departamento de Física e Hospital Universitário da Universidade Estadual de Londrina – Londrina (PR)

RESUMO

Eletródos de tungstênio contendo dióxido de tório (ThO_2) são encontrados no comércio específico e utilizados em determinadas soldas desde sua descoberta. Diversos trabalhos realizaram estudos da radiação proveniente desses eletródos oriundos de distintos fabricantes, caracterizando doses tomadas por aqueles que os utilizam no trabalho de solda diário, por aqueles que os vendem em balcão, por aqueles que transportam caixas do produto via caminhões etc., sempre avaliando e alertando aos cuidados de usos frequentes com razoáveis quantidades do produto. Este estudo leva em conta a propagação de propostas educacionais que divulgam atividades em física nuclear sugerindo o envolvimento de pequenas quantidades de radioisótopos, inclusive o radioisótopo presente nos eletródos de tungstênio, ou até mesmo com baixas atividades quando comparadas aos níveis de isenção impostos pelo órgão regulador nacional, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Deste modo, procura-se aqui estabelecer uma avaliação das estimativas de atividades e doses para três tamanhos desses eletródos radioativos. Com isso, as conclusões deste trabalho não têm a pretensão de 'criminalizar' o uso dos eletródos como materiais educacionais, exemplificados na situação, mas reflexões que sirvam para conscientizar o educador científico das legalidades envolvidas quando almejar o emprego de uma fonte radioativa em situação pedagógica. Nesse sentido, sugerem-se recomendações aos procedimentos legais necessários quando dessa utilização, mesmo que uma fonte radioativa qualquer esteja com atividade inferior ao nível de isenção estabelecido pela CNEN.

PALAVRAS-CHAVE: Uso de radiação ionizante; eletródos contendo tório (ThO_2); práticas experimentais didáticas, ensino básico, CNEN.

ABSTRACT

Tungsten electrodes containing thorium dioxide (ThO_2) have been found in specific stores and have been used in certain solders since their discovery. Several studies have carried out studies of radiation from these electrodes from different manufacturers, characterizing doses taken by those who use them in daily welding work, by those who sell them over the counter, by those who transport product boxes via trucks, etc., always evaluating and alerting to the care of frequent uses with reasonable quantities of the product. This study takes into account the propagation of educational proposals that publicize activities in nuclear physics suggesting the involvement of small amounts of radioisotopes, including the radioisotope present in the tungsten electrodes, or even with low activities when compared to the exemption levels imposed by the regulatory agency national, National Nuclear Energy Commission (CNEN). Thus, an attempt is made here to establish an evaluation of the activity and dose estimates for three sizes of these radioactive electrodes. Thus, the conclusions of this work are not intended to 'criminalize' the use of electrodes as educational materials, exemplified in the situation, but reflections that serve to make the scientific educator aware of the legalities involved when aiming at the use of a radioactive source in a pedagogical situation. . In this sense, recommendations for the necessary legal procedures are suggested when such use is made, even if any radioactive source has activity below the level of exemption established by CNEN.

KEYWORDS: *Use of ionizing radiation; electrodes containing thorium (ThO_2); didactic experimental practices, basic education, CNEN.*

INTRODUÇÃO

No âmbito educacional, sobretudo em nível médio de ensino, alguns trabalhos na literatura têm divulgado propostas experimentais em Física Nuclear que envolvem usos de determinadas fontes radioativas. Dierka e Bastos (2016), por exemplo, sugerem a montagem de um detector de faíscas operando com uma fonte de Am-241 de um detector de fumaça, cuja atividade é cerca de três vezes o valor limite de isenção indicado pela CNEN¹ para esse radioisótopo (CNEN, 2011, p. 9), o que exige procedimentos de proteção radiológica conforme Posição Regulatória 3.01/001:2001(CNEN, 2011) e que, praticamente de forma legal e por questões burocráticas, pode inviabilizar a proposta em escolas. Em outra ocasião, Davila et al. (2021) propõem a utilização do mesmo radioisótopo Am-241 para estudo da quantificação de eventos produzidos pelas radiações ionizantes por uso de um Geiger-Muller de custo reduzido via Arduino. Semelhante e complicada situação burocrática do emprego pedagógico de fonte radioativa em território nacional também se vê avaliada na simples câmara de nuvens de Kamata e Kubota (2012), notando-se que o trabalho, então publicado no exterior, nem especifica qual radioisótopo emissor de radiação alfa fora usado na proposta assim como sua atividade. Outra situação pode ser vista em Boff et al. (2017), que atrelam fontes radioativas alternativas, como as existentes em camisinhas de lampião e eletrodos de tungstênio para solda (BASTOS et al., 2016), ambas contendo Th-232 (dióxido de tório (ThO_2)), em experimentos didáticos de física nuclear, assim como indicam Koželj e Istenič (2013). Os trabalhos acima constituem típicos casos em que se podem questionar as legalidades dos usos dessas e de outras fontes radioativas, tendo em conta a descaracterização de avaliações de atividades e especificações de cuidados especiais ao manuseio e armazenagens das mesmas, denotando uma despreocupação equivocada que se nota transmitida ao educador/leitor interessado.

¹ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR.

Acerca das camisinhas de lampião envolvendo dióxido de tório (ThO_2), cabe destacar as conclusões de Mukherjee et al. (1991, p. 12) ao alertar para alguns riscos da radiação em que recomendam uma campanha de conscientização do potencial perigo radiológico envolvido e sobre um manuseio seguro que a população usuária deveria ter. Aliás, num trabalho anterior, Huyskens et al. (1985, p. 162) aferem um extra de 1000 Bq (além da radiação ambiente) de atividade medido para o tório presente em apenas uma camisinha de lampião. Resultado este que, curiosamente, coincide com o atual valor do nível de isenção estabelecido pela CNEN para o Th-232 (CNEN, 2011, p. 8) e que, via de regra, segue à margem de exigência de um plano de proteção radiológica com referido responsável e licença para tal uso. Nesse contexto, compete enfatizar que o comércio de substâncias radioativas constitui monopólio da União, instituído pela Lei n. 4118 de 27 de agosto de 1962, em que esse monopólio é exercido pela CNEN na "qualidade de órgão superior de orientação, planejamento, supervisão e fiscalização", competindo a ela baixar normas gerais sobre substâncias radioativas e o registro de pessoas que as usem (CNEN, 1989). Mais do que isso, segue a normativa à situação em questão, na qual "a isenção de qualquer fonte ou prática² deve ser sempre sujeita à aprovação pela CNEN e depende, também, de condições específicas de controle, uso ou deposição, levando em conta as propriedades físicas e químicas do material radioativo" (CNEN, 1989, p. 2). Dessas considerações legais, portanto, o presente trabalho realiza uma averiguação das estimativas de doses e atividades de três tamanhos de eletrodos de tungstênio para solda contendo dióxido de tório (ThO_2)³, para então estabelecer uma reflexão/conscientização ao uso educacional nessa linha de raciocínio. Com isso, as conclusões deste trabalho não planejam favorecer o uso ou censura desses, aqui exemplares, produtos analisados como fontes educacionais, mas direcionar um melhor discernimento ao educador científico que almeje o emprego de uma fonte radioativa em atividade didática. Sugerem-se, nesse sentido, recomendações aos procedimentos necessários quando dessa utilização, mesmo que uma fonte radioativa qualquer esteja com atividade inferior ao nível de isenção imposto pela CNEN (CNEN, 1989).

O ELETRODO DE TUNGSTÊNIO PARA SOLDA CONTENDO TÓRIO (ThO_2): DESCRIÇÃO E ANÁLISES

Alguns tipos de eletrodos de tungstênio têm sido usados no processo de solda TIG há mais de 70 anos (AMERICAN WELDING SOCIETY apud SAITO et al., 2003, p. 273). No caso dos eletrodos de tungstênio com tório, estes permitem a operação em correntes mais elevadas (aproximadamente 20% de acréscimo), com mais facilidade à partida e estabilidade do arco, e menos contaminação na soldagem pelo eletrodo em corrente contínua⁴ por comparação com o eletrodo de tungstênio puro. Mesmo assim, esses eletrodos são gradualmente consumidos durante a soldagem e os soldadores afiam suas pontas em intervalos regulares, usando algum esmeril, o que gera um possível risco para a saúde devido à exposição da poeira contendo tório em tais operações de soldagem e afiação (SAITO et al., 2003, p. 273). Saito et al. (2003, p. 277) ainda concluem resultados que admitem uma preocupação à "possibilidade de que as concentrações de Tório-232 aerotransportadas em locais de trabalho de solda se elevem próximo do limite de níveis regulamentados à situação". Os objetos utilizados como exemplo

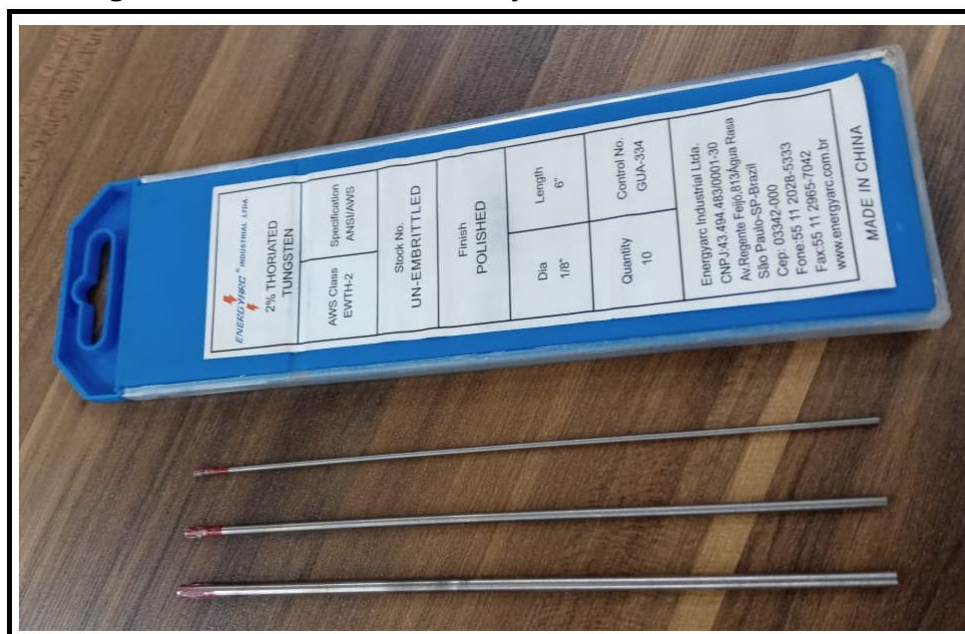
² Grifo nosso.

³ Análises de doses de eletrodos de solda contendo dióxido de tório (ThO_2) podem ser encontrados em outros trabalhos (McDOWELL-BOYER, 1979; SAITO et al., 2003), mas os autores do presente estudo realizaram em laboratórios uma análise paralela para averiguar a dose de três eletrodos exemplares, além de se apresentar aqui alguns cálculos que estimam teoricamente as atividades desses produtos.

⁴ Os eletrodos de tungstênio com tório permanecem com uma ponta fina durante a soldagem, o que facilita a soldagem de aços, porém, na soldagem com corrente alternada tornam-se ineficazes e não têm o mesmo benefício por manterem a ponta arredondada.

neste trabalho são eletrodos deste tipo, em que a Figura 1 apresenta uma foto dos três eletrodos de diferentes dimensões que foram analisados.

Figura 1 – Eletrodos com identificações de fabricante e revendedor.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo fabricantes, o eletrodo de tungstênio radioativo para solda contém cerca de 2% em massa de dióxido de tório (ThO_2)⁵, em geral levado em conta a de um único elemento radioativo, o isótopo Th-232 com meia vida de $1,405 \cdot 10^{10}$ anos e com peso atômico padrão de 232,0377 u. Para efetuar cálculos e estimar a atividade radioativa, outras considerações se fazem necessárias: 1) as proporções de dióxido de tório e de tungstênio estão em peso (McDOWELL-BOYER, 1979, p. 2), não em volume; 2) O peso atômico padrão do oxigênio é de 15,9995u.; A Constante de Avogadro é de $6,02214 \cdot 10^{23}$ mole⁻¹; A densidade do dióxido de tório é de 10 g/cm³; Existem $3,15576 \cdot 10^7$ segundos em um ano, e a meia-vida do Th-232, $t_{1/2} = (1,405 \cdot 10^{10}$ anos) $\times (3,15576 \cdot 10^7$ s/ano), é de $4,4338428 \cdot 10^{17}$ s.

Primeiramente, meçam-se as massas dos diferentes eletrodos, fracionando-se os 2% referente ao dióxido de tório⁶. A fração específica da massa de tório de ThO_2 é então obtida pela expressão: $M_{\text{Th}} = u_{\text{Th}} / (u_{\text{Th}} + 2 u_{\text{O}})$, multiplicando-se esse percentual pela massa de ThO_2 para resultar apenas na massa de tório que há no eletrodo. Já para se calcular o número de moles de Th, divide-se a massa pelo seu peso atômico padrão. Posteriormente, multiplica-se o número de mols pela Constante de Avogadro para se presumir o número de átomos de tório que há na vareta (eletrodo de solda). Convertendo-se a meia-vida do tório de anos para segundos, a atividade (em Bq) é obtida multiplicando o número de átomos de tório pelo logaritmo natural de 2 dividido pela sua meia-vida⁷. A Tabela 1 exhibe os resultados desses cálculos para 3 tamanhos de eletrodos de tungstênio para solda contendo ThO_2 , ao se considerar o percentual de 2% desse material no eletrodo.

⁵ O percentual pode variar entre fabricantes, mas gira em torno de 1,7 a 2,2% (SAITO et al., 2003, p. 275). No presente estudo, foram selecionados eletrodos com tório comercializados pela ENERGYAC® INDUSTRIAL LTDA, que os importa da China e menciona em rótulo esse percentual de 2% (Figura 1).

⁶ Utilizou-se neste trabalho uma balança de precisão marca SHIMADZU, modelo AUWZZ0D.

⁷ Por referência, a atividade específica do Th-232 puro é $4,07 \times 10^3$ Bq/g (SAITO et al., 2003, p. 273).

Tabela 1: Atividades estimadas para os três eletrodos de tungstênio para solda contendo 2% de ThO₂ (Figura 1), todos com iguais comprimentos de 15 cm e diâmetros distintos. Observação: Os valores estão mencionados com arredondamentos.

	Eletrodo com diâmetro de 1,6 mm	Eletrodo com diâmetro de 2,4 mm	Eletrodo com diâmetro de 3,1 mm
Massa Total (g)	5,36	12,30	21,57
Massa em g de ThO₂ (2%)	0,1072	0,246	0,4314
Fração da massa de Th-232 em ThO₂(%)	0,8788	0,8788	0,8788
Massa de Th-232 (g)	0,094	0,216	0,379
Número de mols (nTh)	$4,05 \cdot 10^{-4}$	$9,31 \cdot 10^{-4}$	$16,29 \cdot 10^{-4}$
Número de átomos de Th-232 no eletrodo	$2,44 \cdot 10^{20}$	$5,64 \cdot 10^{20}$	$9,81 \cdot 10^{20}$
Atividade (Bq)	381	877	1534

Fonte: Elaborado pelos autores.

Esses resultados de atividades estimam cerca de 381 decaimentos radioativos de Th-232 a cada segundo na varinha TIG de diâmetro de 1,6 cm, assim como, respectivamente, 877 decaimentos para a de 2,4 cm e 1534 decaimentos para a de 3,1 cm. Considerando esses valores para eletrodos individuais, e pensados como fontes radioativas únicas, apenas os dois menores tamanhos não ultrapassam o valor de isenção imposto pela CNEN (2011, p. 8) de 1000 Bq de atividade para o Th-232. Porém, nenhum eletrodo contendo este radioisótopo é isento porque suas atividades específicas (em atividade/g) ultrapassam inúmeras vezes o limite de 1 Bq/g (CNEN, 2011, p. 8), isto é, cerca de 71,1 Bq/g utilizando-se dos dados da Tabela 1⁸, haja visto pelas normas da CNEN o limite mais restritivo como aquele a ser considerado. Além disto, há trabalhos que mencionam eletrodos produzidos em dimensões ainda maiores. Por exemplo, um eletrodo com 17,5 cm de comprimento, de 3,1 mm de espessura e com 2,2% de tório (McDOWELL-BOYER, 1979, p. 2), e que, seguindo as considerações e os cálculos da Tabela 1, resultaria numa estimativa de 1974 Bq de atividade para um único eletrodo, beirando o dobro do valor imposto para o nível de isenção ao caso (CNEN, 2011, p. 8).

No tocante à Dose Efetiva (CNEN, 2014, p. 13), a Tabela 2 apresenta os valores para cada um dos três eletrodos medidos individualmente com um monitor de radiação calibrado da Marca Ludlum – Modelo 9DP⁹, pertencente ao hemocentro de um Hospital Universitário em que atua, como Supervisor de radioproteção, um dos autores deste estudo. Para isso, procedeu-se estabelecendo o monitor posicionado a uma distância de 10 cm e alinhado perpendicularmente à metade do comprimento do eletrodo, ali posto em horizontal para medição de dose em 24 horas sem interrupção. Quer-se aqui enfatizar que tal procedimento se deu à tentativa de obtenção de valores aproximados de doses efetivas.

⁸ Tal estimativa segue de acordo com dados fornecidos por Herranz et al. (2007, p. 66), em que os valores de atividade específica aos eletrodos de tungstênio contendo tório são de "61,16 Bq/g para 1,7% de ThO₂, 71,8 Bq/g para 2% de ThO₂ e 79,22 Bq/g para 2,2% de ThO₂".

⁹ Monitor de área do tipo câmara de ionização: monitoração β acima de 1 MeV, e raios X e Gama acima de 25 keV. Certificado de calibração com validade até 16 de agosto de 2021.

Tabela 2 – Valores de doses em Sievert (Sv) já excluindo a dose local de radiação de fundo, cuja medição particular perdurou em 0,6 μ Sv em 24 horas. Observação: Os valores seguem mencionados com arredondamentos.

	Eletrodo com diâmetro de 1,6 mm	Eletrodo com diâmetro de 2,4 mm	Eletrodo com diâmetro de 3,1 mm
Valor de Pico	0,2 μ Sv/h	0,3 μ Sv/h	0,4 μ Sv/h
Dose integrada em 24 horas	0,6 μ Sv	1,8 μ Sv	1,8 μ Sv
Dose anual estimada	0,22 mSv	0,66 mSv	0,66 mSv

Fonte: Elaborado pelos autores.

Perante a Norma CNEN NN 3.01 (CNEN, 2014, p. 13), a exposição à radiação ionizante de indivíduos do público deve ser computada de tal modo que a dose efetiva não exceda o limite de 1 mSv/ano. Com os valores da Tabela 2, é possível levantar uma situação hipotética superestimada na qual um indivíduo que permanecesse o ano inteiro próximo a 10 cm de um eletrodo, por exemplo, o maior eletrodo exemplificado na Tabela 2, tal situação resultaria em doses com valores dentro dos limites advertidos. Essa avaliação, portanto, remeteria a uma aparente despreocupação de manuseio, uma vez que se está desprezando situações relativas à contaminação do produto, como ocorreria em maior probabilidade por comparação à ocasião corriqueira de solda. A esta última situação, vale mencionar as conclusões Ludwig et al. (1999), pelas quais uma incorporação considerável de tório ocorrerá durante soldagens, assim como em retificações de tais eletrodos, caso não haja um sistema de sucção apropriado que favoreça a diminuição desse risco aos trabalhadores. Nesse contexto, *“é recomendável que esses eletrodos com tório sejam substituídos por eletrodos sem tório, como eletrodos de lantânio-tungstênio ou cério-tungstênio, para fins de segurança”* e, do contrário, *“é de extrema importância informar aos trabalhadores que o eletrodo contém material radioativo”* ao exercício dos cuidados necessários (SAITO et al., 2003, p. 277). Ademais, enquanto *“o uso de eletrodos de tungstênio com tório pode estar na origem de um risco potencial para o pessoal envolvido no uso de eletrodos, bem como para a população em geral”*, especificamente ao manuseio do eletrodo, é importante ressaltar que o teste de esfregaço revela uma contaminação alfa da área removível, ainda que o risco seja pequeno (LAROCHE et al., 1998, p. 123).

CONSIDERAÇÕES E REFLEXÕES ÀS RECOMENDAÇÕES PARA PROCEDIMENTOS NECESSÁRIOS E LEGAIS DO USO DE FONTES RADIOATIVAS COM FINS EDUCACIONAIS

A Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, foi criada em 1956, com sede na cidade do Rio de Janeiro. É uma autarquia federal ligada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e é responsável por regular e fiscalizar o uso da energia nuclear no Brasil. Atualmente está se desmembrando em CNEN, órgão regulador, e em Agência Nacional, órgão fiscalizador. A primeira prestará somente serviços relacionados à elaboração e revisão de normas, autorizações e licenciamentos, ensino e pesquisa. A segunda atuará na fiscalização e segurança nuclear.

A norma da CNEN que trata das Diretrizes Básicas de Radioproteção é a CNEN-NN-3.01, de março de 2014, aprovada pela Resolução CNEN 164/14 (CNEN, 2014). Esta norma determina as condições específicas relativas a um dos princípios básicos da proteção radiológica, que é o da limitação de doses individuais, utilizando-se de grandezas físicas

específicas, tais como dose equivalente e dose efetiva. Os valores relativos à limitação de doses individuais são apresentados no Anexo C dessa norma. Os valores são diferenciados para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs), que exercem atividades laborais que podem levar à exposição da radiação ionizante, e para indivíduos do público. Obviamente, os indivíduos do público devem ser mais protegidos e os limites são menores do que para os IOEs, que são remunerados para este trabalho, e na maioria das vezes recebem adicionais de periculosidade ou de insalubridade.

Os limites de dose independem da prática, ou seja, do tipo de atividade laboral: operação de equipamento de raios-X, manuseio de fontes emissoras de radiação gama, uso de radioisótopos etc. Por isso, entram os limites de atividade no caso de fontes emissoras de radiação ionizante, ou energia da radiação para casos de equipamentos geradores. Como consequência, tem-se a classificação das instalações radiativas, segundo cada categoria.

Os limites de atividades inferiores aos previstos nas normas isentam materiais ou equipamentos concomitantemente à exigência de licenciamento de instalações que façam uso destes, porém, é necessária a anuência da CNEN, que fornece o certificado de isenção: "*O procedimento relacionado à dispensa de qualquer fonte associada a uma prática deve ser sujeito à aprovação pela CNEN*" (CNEN, 2011, p. 2).

Se o material radioativo for natural, como, por exemplo, a areia monazítica da cidade de Guarapari – ES (PEREIRA et al., 2016), não há atuação do órgão regulador, mesmo que a atividade radioativa esteja superior ao limite de isenção. Todavia, se houver qualquer modificação, seja extração, purificação, enriquecimento etc., a CNEN deve ser consultada. Este é exatamente o caso dos eletrodos para solda citados no presente trabalho. Se, por um lado, a abundância isotópica do tório-232 pode não ter sido alterada, a fabricação do material já caracteriza modificação.

A Coordenação Geral de Instalações Médicas e Industriais (CGMI) da CNEN é responsável também pelas instalações de baixo risco, normalmente de ensino e pesquisa. Autoriza licenciamentos e também isenta práticas com radiação ionizante inferiores aos limites das normas. No caso de licenciamento, a instalação deve possuir pelo menos um responsável pela proteção radiológica autorizado, ou seja, com AP (Autorização para Pesquisa)¹⁰ emitido pela CNEN. Para obtenção do AP, o interessado deve seguir a norma CNEN-NN-6.01 de março de 1999 (CNEN, 1999). O candidato a este registro, que o habilite para o preparo, uso ou manuseio de fontes radioativas, deve apresentar à CNEN: o registro profissional nos conselhos correspondentes, na área científica ou tecnológica (na inexistência de conselho de classe, diploma reconhecido pelo Ministério da Educação); um requerimento para o registro, conforme modelo similar ao do Anexo A da norma citada; e a comprovação de conclusão com aproveitamento em Curso de Radioproteção para o Preparo, Uso e Manuseio de Fontes Radioativas, com carga mínima de quarenta (40) horas, em Instituição credenciada junto ao CFE, Conselho Federal de Educação (CNEN, 1999, p. 5). A solicitação do AP é feita de maneira *on-line* através do site da CNEN, e requer a matrícula da instalação licenciada ou em licenciamento assim como a comprovação do vínculo empregatício ou de prestação de serviço do requerente a esta.

O Curso de Proteção Radiológica gratuito mais conhecido é fornecido por profissionais especializados da Universidade de São Paulo, pertencentes ao GTPR (Grupo de Trabalho em Proteção Radiológica), normalmente em três oportunidades anuais, na capital paulista, em Ribeirão Preto/SP e Piracicaba/SP (<http://www.usp.br/protectoradiologica/>), assim como existem outros e também não gratuitos. Tais capacitações se tornam importantes e ajudam na viabilização inclusive de autorizações de aquisição de fontes importadas com fins

¹⁰ Aplicações no Ensino e na Pesquisa (<http://antigo.cnen.gov.br/index.php/profissionais-certificados>).

pedagógicos e isentas, como as comercializadas pela PASCO (Figura 2) e PHYWE¹¹. Situações estas pelas quais se deve submeter à CNEN o pedido de SLI, "Solicitação de Licença de Importação de material radioativo ou equipamento gerador de radiação ionizante"¹², associando-o ao interesse de "Obter Isenção de Requisitos de Proteção Radiológica de equipamentos geradores de radiação ionizante ou fontes radioativas"¹³.

Figura 2 – Exemplos de fontes radioativas isentas comercializadas pela Pasco.



Fonte: Elaborado pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi motivado pela observação da propagação de artigos na literatura em educação científica que, na intenção de contribuir com a instrução de conteúdos de Física Nuclear em nível básico de ensino, mencionam o emprego de determinadas fontes radioativas em experimentos escolares. Todavia, em âmbito nacional, intencionou-se aqui alertar que muitas dessas propostas estão superficialmente apresentadas sem a informação e/ou envolvimento da necessária regulamentação burocrática do uso de uma fonte radioativa no Brasil, envolvendo cuidados especiais de manuseio e armazenagem da mesma. Ademais, foram citados trabalhos educacionais que divulgam a utilização de distintas fontes radioativas alternativas que necessitariam pelas normas, inclusive, de um licenciamento de instalação além de um responsável pela proteção radiológica, caso este de uma "simples" fonte de Am-241 proveniente de um detector de fumaça, cujo modelo há muito tempo com fabricação e venda proibida em território nacional. Nesse contexto, buscou-se ponderar resultados de atividades e doses de eletrodos de solda radioativos (contendo dióxido de tório), mencionando a sugerida substituição por outro eletrodo de equivalente função e não radioativo conforme literatura pertinente, em que a discussão coube de alerta ao desprezo da legalidade de uma alternativa fonte radioativa com relativa baixa atividade. De todo modo, pode-se dizer que não

¹¹ Comumente fabricadas em forma de disco de plástico ou em forma de "lápiz", com dados impressos (tipo de radionuclídeo e atividade) e certificado. Fornecedores também estão familiarizados com a regulamentação internacional sobre entrega. Exemplos de fontes isentas comercializadas são: Po-210 (fonte alfa de 3,7 kBq); Sr-90 (fonte beta de 3,7 kBq); Co-60 (fonte gama e beta de 37 kBq); Tl-204 (fonte beta de 37 kBq).

¹² <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm602.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2021.

¹³ <https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-isencao-de-requisitos-de-protecao-radiologica-de-equipamentos-geradores-de-radiacao-ionizante-ou-fontes-radioativas>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2021.

há restrições legais contra o uso de fontes radioativas para experimentos escolares, mas os requisitos para escolas são os mesmos que para qualquer outra pessoa jurídica que possua ou use uma fonte radioativa qualquer. Como descrito, via CNEN, o uso de quaisquer radionuclídeos que não estejam em meio natural carece de justificação e de autorização independente das atividades dos mesmos, e, quando imprescindível, efetuar-se um planejamento de otimização da proteção radiológica respeitando os limites/restrições de doses para fontes não isentas. Enfim, espera-se que as reflexões deste estudo contribuam para aumentar a transparência dos esforços para uso seguro e legal de fontes radioativas com atreladas tecnologias nucleares em escolas.

REFERÊNCIAS

BASTOS, R. O.; BOFF, C. A.; MELQUÍADES, F. L. Nuclear physics experiments with low cost instrumentation. **Physics Education**, v. 51, p. 65013(6), 2016.

BOFF, C. A.; BASTOS, R. O.; MELQUÍADES, F. L. Práticas experimentais no ensino de física nuclear utilizando material de baixo custo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 236-247, abr. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2017v34n1p23>. Acesso em: 5 de novembro de 2020.

CNEN. **Requisitos para o registro de pessoas físicas para o preparo, uso e manuseio de fontes radioativas**. Norma CNEN NN 6.01 – Resolução CNEN 005/99, março de 1999. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm601.pdf>. Acesso em: 02 de agosto de 2021.

CNEN. **Critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica. Posição Regulatória – 3.01/001: 2011** (2011). Disponível em: http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_01.pdf. Acesso em: 26 de outubro de 2020.

CNEN. **Para raios com material radioativo – Resolução CNEN 04/89**, 1989. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm814.pdf>. Acesso em: 27 de novembro de 2020.

CNEN. **Diretrizes básicas de proteção radiológica (Norma CNEN NN 3.01 – Resolução 164/14)**. 2014. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Acesso em: 8 de janeiro de 2020.

DAVILA, L. Y.A.; ROCHA, A. S.; SOUSA, R. L.; CHOQUE, N. M. S. Desenvolvimento de um sistema simples de detecção e quantificação de radiação ionizante com base em um sensor Geiger-Muller SI-22G, na plataforma Arduino e no ambiente de desenvolvimento de sistemas Labview. **A Física na Escola**, v. 19, n. 1, 2021. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Desktop/Artigos%20Novos/artigos%20para%20enviar/artigo%20Eu,%20Paulo,%20Fabinho%20eletrodo%20de%20solda/%C3%9Altima%20vers%C3%A3o/ARTIGO%20FINAL/tear/FnE-19-1-201103.pdf>. Acesso em: 11 de março de 2021.

DIERKA, T.; BASTOS, R. O. Montagem de um detector de radiação alfa por faísca elétrica para o ensino. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**, IV, Ponta Grossa – PR, 2016. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/01469384592.pdf>. Acesso em: 23 de novembro de 2019.

HERRANZ, F.; LEGARDA, F.; NÚÑEZ-LAGOS, R.; PÉREZ MARÍN, C.; SAVIRÓN, M. Thorium Applications in Spain. In: IAEA (International Atomic Energy Agency), 2007. **Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V), Proceedings of the Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material**, organised by the University of Seville in Cooperation with the International Atomic Energy Agency, the Spanish Nuclear Safety Council, and the University of Huelva, Seville, 19–22 March of 2007, Vienna. Disponível em:

<https://pure.spbu.ru/ws/portalfiles/portal/48787920/Spain.pdf#page=72>. Acesso em: 2 de fevereiro de 2021.

HUYSKENS, C.J.; HEMELAAR, J.T.; KICKEN, P.J. Dose estimates for exposure to radioactivity in gas mantles. **Science of Total Environment**. V. 45, n. 157, 1985. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/19079869_Dose_estimates_for_exposure_to_radioactivity_in_gas_mantles. Acesso em: 26 de outubro de 2020.

KAMATA, M.; KUBOTA, M. Simple cloud chambers using gel ice packs. **Physics Education**, v. 47, n. 4, p. 429-433, 2012.

KOŽELJ, M.; ISTENIČ, R. Radioactivity Experiments For Schools. **NENE – 22nd International Conference Nuclear Energy for New Europe**. Bled-Slovenia, 9-12 september, 2013. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Desktop/Artigos%20Novos/artigos%20para%20enviar/artigo%20Eu,%20Paulo,%20Fabinho%20eletrodo%20de%20solda/%C3%9Altima%20vers%C3%A3o/NENE2013_1313.pdf. Acesso em: 25 de janeiro de 2021.

LAROCHE P, CAZOULAT A, ROTGER C, PETITOT F, GÉRASIMO P. Le thorium: analyse et dosimétrie des électrodes de soudures thoriées [Thorium: analysis and dosimetry of thorium welding electrodes]. French. PMID: 9770019. **Ann Pharm Fr**, v. 56, n. 3, p:123-33, 1998. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9770019/>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2021.

LUDWIG, T.; SCHWA, D.; SEITZ, G. SIEKMANN, H. Intakes of Thorium While Using Thoriated Tungsten Electrodes for TIG Welding. **Health Physics – The Radiation Safety Journal**, 77 (4): 462-469, October, 1999. Disponível em: https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1999/10000/Intakes_of_Thorium_While_Using_Thoriated_Tungsten.15.aspx. Acesso em: 11 de janeiro de 2021.

McDOWELL-BOYER, L M. **Estimated radiation doses from thorium and daughters contained in thoriated welding electrodes**. United States: N. p., 1979. doi:10.2172/5760281. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5760281>. Acesso em: 5 de novembro de 2020.

MUKHERJEE, B.; LEMBO, L.; MANZOOR, S. Gas lantern mantle: a low activity alpha particle source. **Radiation Protection in Australia**. V. 9, n. 11, 1991. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263351698_Gas_Lantern_Mantle_A_low_activity_alpha_particle_source. Acesso em: 26 de outubro de 2020.

PEREIRA, A. M.; SANTOS, A. C. F.; AMORIM, H. S. Estatística de contagem com a plataforma Arduino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38 (4), junho, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172016000400601&script=sci_arttext&tIng=pt. Acesso em: 12 de maio de 2021.

SAITO, H.; HISANAGA, N.; OKADA, Y.; HIRAI, S.; ARITO, H. Thorium-232 Exposure during Tungsten Inert Gas Arc Welding and Electrode Sharpening. **Industrial Health**, v. 41, p. 273-278, 2003. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/indhealth1963/41/3/41_3_273/pdf-char/en. Acesso em: 11 de janeiro de 2021.