

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA DE TAMBORES DE REJEITO RADIOATIVO UTILIZANDO-SE TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO MATEMÁTICA**

Ademar José Potiens Júnior, Goro Hiromoto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Av. Lineu Prestes, 2.242  
05508-900 Butantã, São Paulo, SP, Brasil  
e-mail: [apotiens@net.ipen.br](mailto:apotiens@net.ipen.br), [hiromoto@net.ipen.br](mailto:hiromoto@net.ipen.br)**RESUMO**

Um dos importantes aspectos relativos ao desenvolvimento da tecnologia nuclear é a gestão segura dos rejeitos radioativos provenientes das várias etapas do ciclo do combustível nuclear, bem como da produção e utilização de radioisótopos na medicina, indústria e centros de pesquisa. A caracterização exata desses rejeitos não é tarefa simples, dada a sua diversidade em composição isotópica e heterogeneidade na distribuição espacial e densidade de massa. Uma das dificuldades está na obtenção da eficiência de contagem dos detectores, pois a infinidade de combinações possíveis entre atividade e posição dos radionuclídeos no tambor torna impraticável o preparo de padrões para calibração. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de análise para quantificação de radionuclídeos não homogeneamente distribuídos em um tambor de 200 L, visando a caracterização isotópica dos rejeitos armazenados no IPEN.

Keywords: Radioactive Waste, Drum Characterization, Monte Carlo Method, Artificial Neural Network

**I. INTRODUÇÃO**

Todos os rejeitos radioativos atualmente gerados no país classificam-se como rejeitos de atividade intermediária ou baixa. Esses rejeitos estão sendo temporariamente armazenados nos diversos centros de pesquisa subordinados à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e na Usina Termonuclear de Angra dos Reis.

Excetuando-se os rejeitos de mineração e beneficiamento do urânio e tório e as bem caracterizadas fontes seladas esgotadas, os demais, praticamente em sua totalidade, estão armazenados em tambores de aço de 200 L.

O Brasil não tem ainda definido o local onde será construído o repositório final que, no futuro, receberá esses rejeitos. Independentemente do local escolhido, tais rejeitos necessitarão obedecer aos critérios de aceitação para disposição final, que estão sendo atualmente elaborados pela CNEN. Da forma físico-química em que estão atualmente armazenados, até a forma final aceitável para disposição definitiva, esses rejeitos precisarão ser devidamente caracterizados sob o ponto de vista de sua composição isotópica e tratados [1].

No Brasil, os tambores de rejeitos radioativos vêm sendo estocados desde a década de 70 e, em sua maioria, caracterizados de forma imprecisa por falta de instrumentação adequada. Praticamente todos os tambores

apresentam somente uma indicação qualitativa dos radionuclídeos presentes, informada pelo gerador do rejeito.

É provável que muitos destes tambores contenham quantidades muito pequenas de material radioativo, quer seja devido ao longo tempo de armazenamento, quer por segregação inadequada dos rejeitos à época de seu acondicionamento. Para que se possa efetuar uma triagem dos tambores, identificando aqueles que poderiam ser reclassificados como rejeito não radioativo, é necessário instrumentos adequados de detecção.

O IPEN possui atualmente um sistema de caracterização isotópica de tambores de 200 L, composto de 1 detector de Germânio Hiperpuro (HPGe) e eletrônica associada, um dispositivo para rotação manual do tambor e um software comercial para análise de dados. No entanto, tal sistema não é suficientemente sensível para quantificar com precisão os radionuclídeos presentes no tambor.

O desenvolvimento de um novo sistema de análise possibilitaria, além do cumprimento das exigências legais de caracterização, a identificação daqueles tambores contendo rejeitos que poderiam ser classificados como não radioativos, minimizando o volume e reduzindo custos de armazenamento temporário, tratamento e disposição final [2,3].

Uma das dificuldades para o desenvolvimento desse sistema é a obtenção das eficiências de contagem dos detectores, visto que há infinitas combinações possíveis

entre atividade e posição dos radioisótopos nos tambores de rejeito. Essas combinações tornam impraticável a preparação de padrões de calibração. Nessa comunicação é apresentada uma metodologia de quantificação radioisotópica em tambores de 200 L, baseada em simulações pelo Método de Monte Carlo para geração dos dados e Redes Neurais Artificiais para tratamento.

## II. METODOLOGIA

O trabalho pode ser dividido em três etapas: Geração de dados, treinamento da rede neural e validação da metodologia proposta.

A maior dificuldade na caracterização dos tambores de 200 L é equacionar a não homogeneidade espacial dos radionuclídeos presentes. Um tambor homogêneo poderia ser facilmente calibrado em eficiência, para uma determinada geometria de contagem, por espectrometria gama. Mas, no caso real, geralmente uma mistura de radionuclídeos está distribuída aleatoriamente dentro do tambor, devido às características dos procedimentos adotados para colocação dos rejeitos dentro dos mesmos.

A primeira etapa do trabalho será então a calibração em eficiência de contagem de um detector HPGe, em função da distribuição espacial dos radionuclídeos no tambor. Códigos computacionais específicos, baseados na técnica de simulação por Monte Carlo, são capazes de fornecer resultados teóricos que estão em razoável acordo com os resultados medidos, em relação à dependência espacial [4,5].

Para isso, serão efetuadas simulações pelo método de Monte Carlo, através do código MCNP4, bastante difundido no meio acadêmico e extensivamente validado [6].

O tambor de 200 L deverá ser dividido em malhas onde cada unidade terá dimensões apropriadas. A escolha da dimensão da malha deverá ser feita em função do compromisso entre situações reais plausíveis e da qualidade dos dados a serem obtidos e cada uma delas poderá conter ou não determinado radionuclídeo.

Aproveitando a simetria gerada com a rotação do tambor a velocidade constante, a proposta é dividi-lo em fatias transversais e internamente em cascas cilíndricas concêntricas. Esquemas simples mostrando a idéia de como deverão ser as malhas no tambor podem ser vistos nas Fig. 1, seções transversais, e Fig. 2, cascas cilíndricas.

A partir daí deverão ser esgotadas todas as possibilidades de distribuições geométricas combinadas de ocupação de radionuclídeos nessas malhas, fornecendo cenários de como poderia estar distribuído o rejeito no interior do tambor de 200 L.

Todas essas combinações deverão, através de simulações pelo método de Monte Carlo, fornecer as respostas em detectores posicionados estrategicamente. As posições de observação, ou seja, a posição onde será colocado o detector também será variável, paralelamente ao eixo azimutal do tambor.

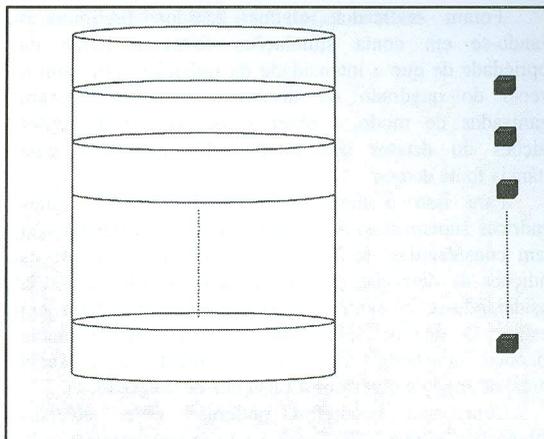


Figura 1. Esquema Geométrico do Tambor Seccionado Transversalmente e das Posições de Detecção.

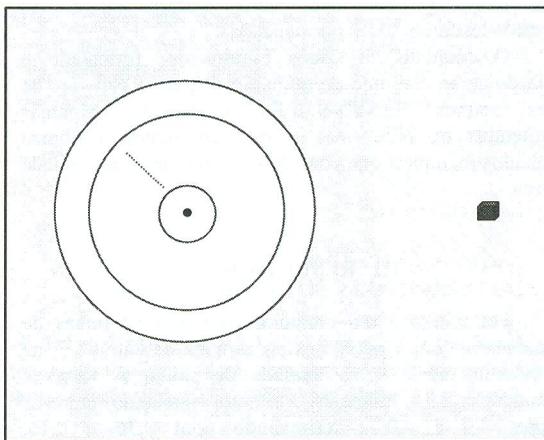


Figura 2. Esquema Geométrico do Tambor Dividido em Cascas Cilíndricas Concêntricas e das Posições de Detecção.

A combinação das diversas possíveis distribuições espaciais de um radionuclídeo com as diferentes posições do detector nos forneceria um conjunto de dados que, devidamente tratados, podem nos fornecer um mapeamento de uma distribuição desse radionuclídeo dentro do tambor.

Para o tratamento dos dados gerados nas simulações deverá ser utilizada a técnica de Redes Neurais Artificiais. A rede neural será então treinada com o conjunto de resposta dos detectores, em função da configuração dos radionuclídeos no tambor, e deverá posteriormente ser capaz de fornecer a distribuição desses radionuclídeos.

Conhecendo-se essa distribuição podem-se utilizar os dados simulados para se obter a eficiência de detecção para um determinado radionuclídeo.

O software que deverá ser utilizado é o módulo de redes neurais do MATLAB 6.1. A arquitetura da rede será definida posteriormente de acordo com a complexidade do problema. O algoritmo de treinamento será o de "Backpropagation".

Foram realizados alguns estudos preliminares levando-se em conta simulações feitas a partir da propriedade de que a intensidade da radiação varia com o inverso do quadrado da distância. Os dados foram organizados de modo a obter respostas em diferentes posições do detetor das intensidades atenuadas pela distância fonte detetor.

Para isso o tambor foi dividido em 4 fatias cilíndricas superpostas. As dimensões reais do tambor não foram consideradas, sendo levado em conta somente as condições de detecção. A influência no detetor é obtida considerando-se o centro geométrico de cada fatia em questão. O detetor foi posicionado a uma distância horizontal constante, variando-se somente a distância vertical de modo a obtermos 4 posições de detecção.

Com essa geometria podemos obter diversas combinações entre as fatias para produzir respostas em cada uma das posições de detecção. Para essas combinações considerou-se que cada uma das fatias poderia, ou não, sensibilizar os detetores e as suas combinações possíveis para fontes de intensidade zero, unitária ou 5. As intensidades foram todas normalizadas.

O conjunto de dados obtidos foi formatado e utilizado como conjunto de treinamento para o software de redes neurais EASYNN. Foram testadas algumas arquiteturas de rede, mas a que apresentou melhores resultados foi aquela que considerou 5 neurônios na camada interna.

### III. RESULTADOS

Foi utilizado um conjunto contendo 80 linhas de treinamento, com 4 neurônios na camada de entrada, 5 na camada interna e 4 na camada de saída. A taxa de aprendizado e o momento variaram iniciando com os valores 1,0 e 0,8 e terminando com 0,36 e 0,16, respectivamente. O erro foi configurado em 0,003.

Para se obter o resultado desejado foram realizados 713.214 ciclos de treinamento. Após o treinamento a rede foi testada e respondeu corretamente informando quais as fatias do tambor continham fontes e qual a sua intensidade podendo assumir os valores 0 (zero), 1 (um) ou 5 (cinco).

As considerações que foram feitas nessa simulação servem apenas para demonstrar que é possível que uma rede neural seja construída e treinada com dados desse tipo e que forneça uma resposta coerente.

### IV. REFERÊNCIAS

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Near Surface Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements, Safety Standards Series, No. WS-R-1**, IAEA, Vienna, 1999.

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control. Safety Series No. 89**, IAEA, Vienna, 1988.

[3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Clearance of Materials Resulting from the Use of Radionuclides in Medicine, Industry and Research. IAEA-TECDOC-1000**, IAEA, Vienna, 1998.

[4] Korun, M., Vidmar, T., **Monte Carlo calculations of the total-to-peak ratio in gamma-ray spectrometry**, Applied Radiation and Isotopes, vol. 52, p. 785-789, 2000.

[5] Ashrafi, S., Likar, A., Vidmar, T., **Precise modeling of a coaxial HPGe detector**, Nuclear Instruments and Methods, vol. 438, p. 421-428, 1999.

[6] Ródenas, J., Martinavarro, A., Rius, V., **Validation of the MCNP code for the simulation of Ge-detector calibration**, Nuclear Instruments and Methods, vol. 450, p. 88-97, 2000.

### ABSTRACT

The safety management of radioactive waste is one of the most important aspects of the nuclear technology development. The exact characterization of these radioactive waste is not an easy task, considering its isotope composition diversity, heterogeneous spatial distribution and mass density. One of these difficulties is to obtain the detector counting efficiency, since the infinite possible combination of activity and radioisotope position in waste drum becomes impracticable the preparation of the calibration standards. In this communication a methodology for radioisotope quantification in a 200 L waste barrel is presented, using Monte Carlo simulation for data generation and Artificial Neural Network for data treatment.