

# Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Caracterização de Tambores de Rejeito Radioativo

Ademar José Potiens Júnior<sup>1</sup>, Goro Hiromoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Av. Prof. Lineu Prestes, 2242  
05508-000, Brasil  
[apotiens@ipen.br](mailto:apotiens@ipen.br), [hiromoto@ipen.br](mailto:hiromoto@ipen.br)  
<http://www.ipen.br>

**Resumo.** A caracterização isotópica de rejeitos radioativos armazenados em tambores de 200 litros não é uma tarefa simples, por causa da sua distribuição espacial heterogênea. A maior dificuldade está no preparo dos padrões para a calibração dos detectores. Para contornar esse problema faz-se uso de técnicas de simulação matemática que substituem a preparação de inúmeros padrões de calibração evitando a geração de mais rejeito. A metodologia consiste na simulação do sistema tambor-detector por Monte Carlo para a obtenção das eficiências de contagem. Os dados obtidos foram tratados e então foi construída uma Rede Neural Artificial (RNA) para a avaliação da atividade total do tambor. Para a validação do método foram efetuadas medidas em 10 posições paralelas ao eixo do tambor e os resultados submetidos à RNA. A metodologia desenvolvida mostrou-se eficaz para a caracterização isotópica de rejeitos radioativos emissores gama distribuídos de maneira heterogênea em um tambor de 200 litros. O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia de análise para quantificação e localização de radionuclídeos não homogênea distribuídos em um tambor de 200 litros baseado nas técnicas matemáticas.

## 1 Introdução

O IPEN armazena atualmente em seus galpões cerca de 300 m<sup>3</sup> de rejeito radioativo tratado, sendo que sua maioria, cerca de 50 % é de rejeito sólido compactável [1]. Apesar do Brasil não ter ainda definido o local onde será construído o repositório final que, no futuro, receberá esses rejeitos eles necessitarão obedecer aos critérios de aceitação para disposição final [2]. Da forma físico-química em que estão atualmente armazenados, até a forma final aceitável para disposição definitiva, esses rejeitos precisarão ser devidamente caracterizados [3]. A aplicação de técnicas matemáticas é uma maneira comum para resolver problemas decorrentes de geometrias complexas geralmente encontradas em espectrometria gama de tambores de rejeitos radioativos. A principal dificuldade é a determinação da eficiência de contagem dos detectores, uma vez que os rejeitos não estão distribuídos homogênea dentro dos tambores, tornando inviável a preparação de padrões de calibração. O método de Monte Carlo é

uma ferramenta muito útil para resolver esse tipo de problema. Foi desenvolvida recentemente no ipen uma metodologia para caracterização radioisotópica de tambores de rejeito radioativo[4]. O método utiliza técnicas matemáticas de simulação por Monte Carlo por meio do software MCNP-4C [5], que é o código mais utilizado na área nuclear, simulando as fontes de radiação e o transporte e a interação dos fótons no meio em estudo Outra técnica utilizada é a de RNA por meio do software MatLab[6]. A utilização dessas duas técnicas estabelece uma metodologia [7] para a determinação da atividade total em um tambor contendo rejeito radioativo Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma metodologia para estimar a atividade de um tambor de 200 L de rejeitos radioativos, bem como mapear sua distribuição no interior do tambor, para aplicação na caracterização isotópica dos rejeitos radioativos armazenados no IPEN.

## **2 Metodologia.**

Uma vez que as eficiências são obtidas é possível obter um conjunto de dados combinando-as com prováveis intensidades de fontes, gerando assim um arquivo de entrada que é utilizado para treinar uma RNA.

### **2.1 Simulação**

Considerando que os tambores de rejeitos radioativos geralmente apresentam uma distribuição heterogênea, sua divisão em células volumétricas permite obter as eficiências de detecção de cada uma delas para um conjunto de detectores posicionados próximo ao tambor. Essas eficiências foram obtidas por simulação pelo Método de Monte Carlo utilizando o código MCNP-4C.

Com base nesse conjunto de eficiências e combinando-as com valores de atividade para cada fonte que preenche cada uma destas células volumétricas, obteve-se um conjunto de dados, que tratado adequadamente forneceu um arquivo de entrada. Este arquivo de entrada foi utilizado para treinar uma rede neural e criando-se assim um algoritmo que identifica as posições e as atividades dessas fontes dentro do tambor.

Para desenvolver a simulação por Monte Carlo algumas informações sobre a composição e dimensões geométricas do sistema composto pelo detector e o tambor foram necessárias. A parede do tambor é composta por aço com as especificações ASTM A-366. O interior do tambor é preenchido com papel compactado. As densidades do aço e do papel são respectivamente 7,86 g/cm<sup>3</sup> e 0,5 g/cm<sup>3</sup>. As dimensões de tambor são apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1.** Dimensões do tambor.

Dimensões (cm)	
Altura	86
Diâmetro externo	56
Espessura da parede	1,125
Espessura da tampa	1,125
Espessura da base	1,125

O detector foi modelado de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante, apresentadas na tabela 2. As densidades do cristal de Ge e do alumínio são 5,36 e 2,7 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

**Tabela 2.** Dimensões do detector.

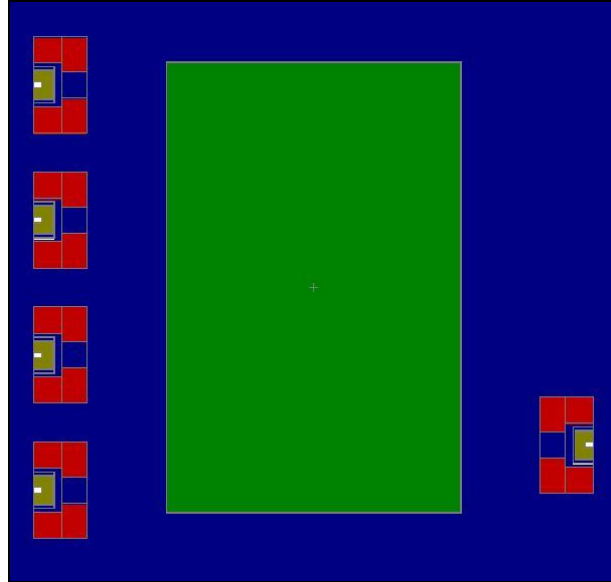
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
Cristal de Ge	51,8	36	--
Cavidade do cristal	12	16	--
1 camada de Al	56,6	36	0,8
2 camada de Al	70	39	1

O detector está envolvido em um colimador de chumbo, com densidade de 11,35 g/cm<sup>3</sup>, cujas dimensões são apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3.** Dimensões do colimador.

Dimensões (mm)		
Diâmetro externo		183
Comprimento		280
Cavidade maior	Diâmetro	93
	Comprimento	230
Cavidade menor	Diâmetro	50
	Comprimento	50

Depois de modelado o sistema completo composto pelo detector, colimador e tambor visto pelo código MCNP-4C é apresentado na figura 1.



**Fig. 1.** Corte longitudinal do sistema mostrando 5 posições de detecção

Para a determinação das eficiências de contagem foi simulada uma fonte de Cs-137 com 4 cm de altura e 15 cm de diâmetro. O tambor foi dividido em 10 camadas e foram simuladas 10 posições de medida com os detectores posicionados a 15 cm da superfície do tambor. Foram obtidos 100 valores de eficiência relativos aos 10 detectores e às 10 camadas do tambor. Essas eficiências foram combinadas com 3 valores de intensidade de fonte, obtendo-se assim uma matriz de 59.049 linhas e 20 colunas, que foi dividida em 2 partes gerando os arquivos de entrada e saída da RNA.

### **2.1 Validação experimental**

A instrumentação para a validação experimental do método é composta de um detector coaxial de Germanio Hiperpuro (HPGe) com 15 % de eficiência, modelo EGPC-15-190-R, fabricado pela Eurisys, ligado a um sistema de aquisição gerenciado pelo software InterWinner. Foi utilizada uma fonte de Cs-137 com 2 MBq de atividade, fabricada pela Amersham com data de referência de 01/09/2002. A fonte é cilíndrica e suas dimensões são 3,5 cm de altura e 1 cm de diâmetro.

Um tambor de 200 litros foi perfurado lateralmente para que fosse possível introduzir a fonte de Cs-137. As perfurações foram 4,5 cm de diâmetro e alcançaram o centro do tambor e foram introduzidos tubos de PVC.

O detector foi posicionado a 15 cm da parede do tambor com as 10 posições de medida variando ao longo do seu eixo. A figura 2 apresenta o sistema de medida utilizado.



**Fig. 2.** Sistema composto pelo detector de HPGe e o tambor de 200 liters

Para a validação foram efetuadas as contagens nas 10 posições de medida. Os espectros obtidos foram analisados pelo software InterWinner, as contagens de pico foram submetidas a RNA e os resultados comparados com a posição real da fonte no tambor e sua respectiva atividade.

### **3 Resultados e conclusões.**

Para a construção e treinamento da RNA foi utilizado o módulo de redes neurais do software MatLab 7.0. A rede foi construída com uma arquitetura contendo 10 neurônios na camada de entrada, 18 na camada oculta e 10 na camada de saída. O algoritmo de treinamento foi o “traincgb” e o erro quadrático médio (MSE) depois de 300 EPOCHS foi de  $6,56 \times 10^{-4}$ .

Para a validação experimental foram consideradas três situações. Na primeira a presença de apenas uma fonte de Cs-137 de 2 MBq posicionada no centro de algumas das camadas do tambor, como pode ser visto na Fig. 3. São as camadas 1, 2, 3, 4 e 5.

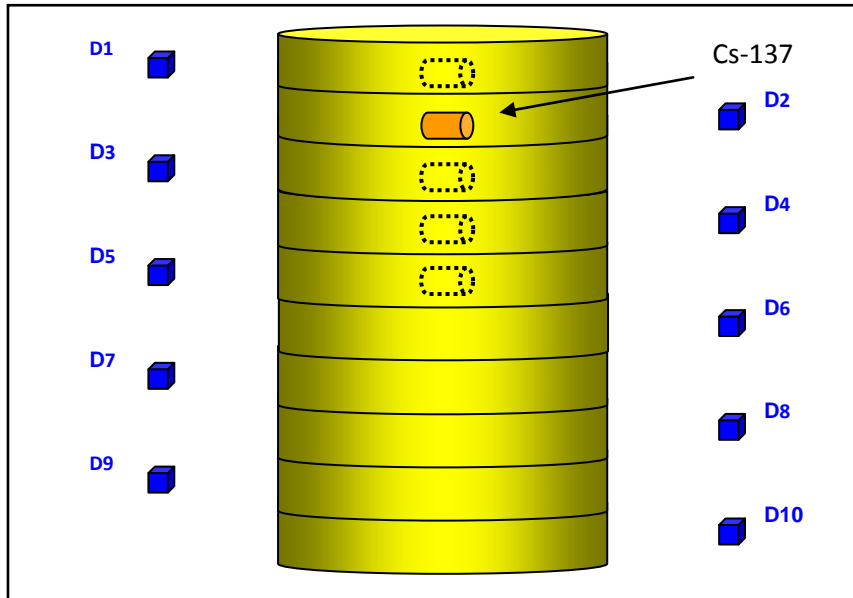


Fig. 3. Representação da posição da fonte para a primeira situação

Em outra situação duas fontes de Cs-137 de 2 MBq posicionadas simultaneamente no centro das camadas 1 e 5 do tambor, representado na Fig. .

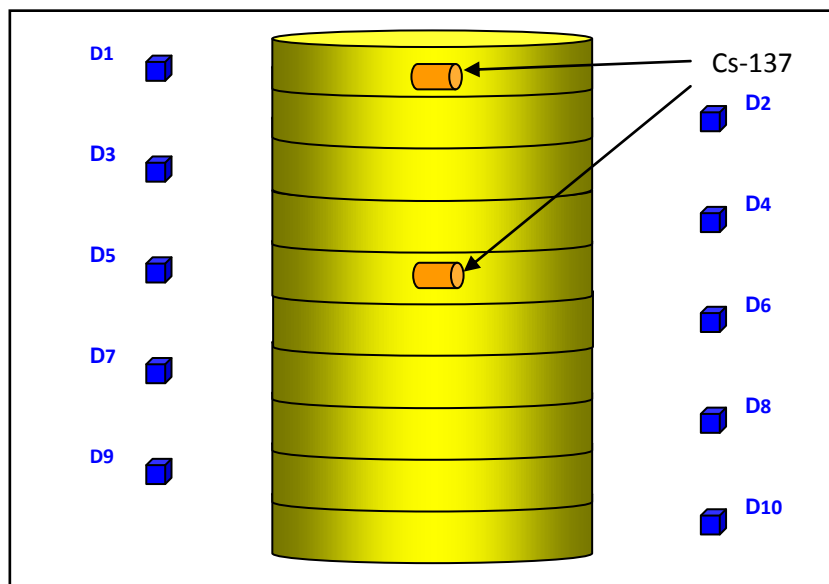


Fig. 4. Representação da posição das fontes para a segunda situação

Em uma terceira situação a fonte de Cs-137 de 2 MBq foi colocada próxima à parede do tambor, como pode ser visto na Fig. , que foi girado sobre seu eixo simulando um movimento de rotação, e foram realizadas medidas em 8 ângulos diferentes para cada posição de detecção.

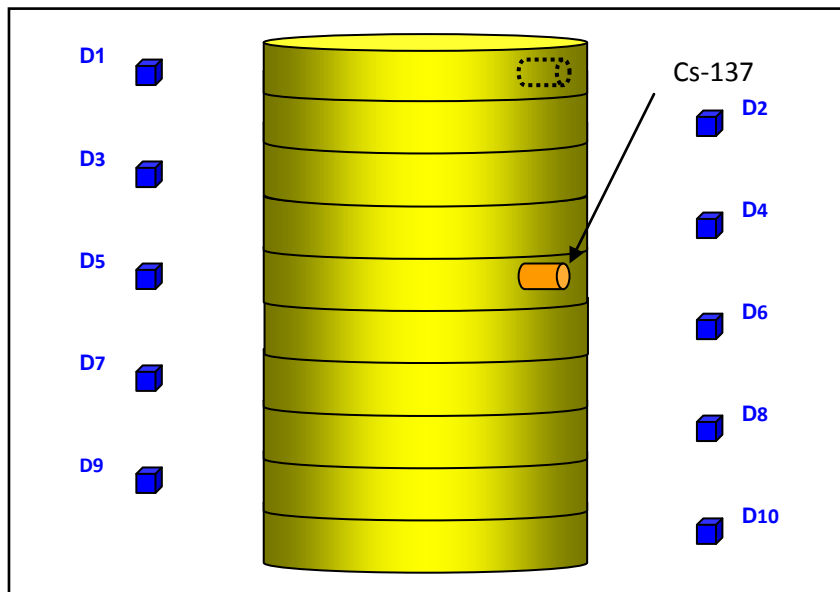


Fig. 5. Representação da posição da fonte para a terceira situação

A tabela 3 apresenta os resultados fornecidos pela RNA mediante as contagens mnas 10 posições de medida para as 3 situações.

**Tabela 3.** Erros percentuais entre a situação real das posições e atividades das fontes e os valores fornecidos pela RNA

<i>Situações de medida</i>	<i>Erro percentual</i>	<i>Localização da fonte de Cs-137</i>
Primeira situação, camada 1	4,91 %	correta
Primeira situação, camada 2	4,51 %	correta
Primeira situação, camada 3	1,74 %	correta
Primeira situação, camada 4	6,37 %	correta
Primeira situação, camada 5	28,85 %	correta
Segunda situação, camadas 1 e 5 simultâneas	23,73 % camada 1 33,35 % camada 5	correta para as duas camadas
Terceira situação, camada 1	4,46 %	correta
Terceira situação, camada 5	7,46 %	correta

Analisando os resultados podemos concluir que a metodologia proposta é eficaz na determinação da atividade de tambores de 200 L e pode ser utilizada na caracterização de tambores de rejeito radioativo. O método identificou em todas as situações as posições corretas das fontes de Cs-137. Na situação onde havia somente uma fonte de Cs-137 os erros percentuais foram pequenos com exceção da fonte posicionada na camada 5. Mesmo para a situação onde haviam duas fontes os valores dos erros percentuais ainda são considerados aceitáveis.

## Referências

1. Dellamano, J. C. Otimização da etapa de armazenamento de rejeitos radioativos. Tese Doutorado (2005) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
2. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, CNEN-NN-6.09, Rio de Janeiro, 2002.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Near Surface Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements, Vienna, 1999 (Safety Standards Series, No. WS-R-1).
4. Potiens Jr., A. J. Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Caracterização Isotópica de Tambores de Rejeito Radioativo. Tese Doutorado (2005) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.



5. Briesmeister, J.F. (Ed.). MCNP<sup>TM</sup> – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, December 2000.
6. MATLAB, The Language of Technical Computing, version 7.0.4.365 (R14) Service Pack 2: The MathWorks Inc., 2005. “Neural Network Toolbox 4.0.1”.
7. Potiens JR., A.J. and Hiromoto, G. “Artificial Neural Networks in the Evaluation of the Radioactive Waste Drums Activity”, Proceedings of the Second European IRPA Congress on Radiation Protection, Paris-França, 15-19 de maio, CD-ROM (2006).