

Análise de Imagens obtidas por Radiografia com Nêutrons

AILTON FERNANDO DIAS^{1,2}
ARNALDO DE ALBUQUERQUE ARAÚJO²

¹CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
Caixa Postal 1941 - 30.161-970 - Belo Horizonte, MG, Brasil
cdtn@brufmg

²DCC - Departamento de Ciência da Computação
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
Caixa Postal 702 - 30.161-970 - Belo Horizonte, MG, Brasil
arnaldo@dcc.ufmg.br, afdcdtn@dcc.ufmg.br

Abstract. Neutron radiography is an important non-destructive testing technique. It is specially useful for hydrogenous materials inspection and it reveals invisible details to other radiographic methods. Radiographic images have been obtained by using the neutron radiography device of the IPR-R1 reactor. This work describes the employment of digital image processing to neutron radiographs at CDTN.

Introdução

Este trabalho descreve a aplicação de rotinas de processamento digital de imagens (PDI) a imagens obtidas através de radiografia com nêutrons no reator IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). A radiografia com nêutrons constitui um processo de ensaio não-destrutivo, tendo sido investigada pela primeira vez por Kallman e Kuhn, em 1935, na Alemanha. Esse processo é empregado em problemas especiais de inspeção, onde não há possibilidade de obtenção de radiografias por raios-X ou por raios γ , ou ainda para complementar esses dois métodos, com fornecimento de detalhes adicionais. Na verdade, as diferenças de absorção entre nêutrons e raios-X indicam que as técnicas são complementares entre si e, juntas, expandem a utilidade da radiografia como método de análise [Berger (1965)]. O método de obtenção da radiografia com nêutrons é baseado no registro da imagem produzida por um objeto posicionado entre o fluxo colimado de nêutrons e o conjunto conversor-filme. Essa imagem é formada indiretamente pelos nêutrons que atravessam o objeto e interagem com o conversor, emitindo radiações γ e β que impressionam o filme. O tempo de exposição e o tipo de filme mais adequado são determinados para cada condição do sistema [Amorim (1987)].

O Reator IPR-R1

Há cerca de 60 reatores *TRIGA* em operação no mundo, sendo que, de acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), eles representam cerca de 20 % do total de reatores de pesquisa atualmente em operação. O reator IPR-R1 é um reator *TRIGA Mark-1*, fabricado pela *General Atomics* (USA), que se encontra

em operação desde 1960. O núcleo do reator IPR-R1, que se encontra instalado em uma piscina de cerca de seis metros de profundidade, consiste de 58 varetas de elementos combustível-moderador de hidreto de zircônio, contendo 8,0 wt% de urânio enriquecido a 20%, revestidas de alumínio. A potência nominal do reator é de 100 kW. Cinco dispositivos de irradiação equipam o reator IPR-R1, que são listados a seguir, com seus respectivos fluxos de nêutrons térmicos à potência de 100 kW: (i) tubo central ($4,3 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); (ii) mesa giratória, que comporta até 40 amostras simultaneamente ($6,6 \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); (iii) terminal pneumático no núcleo ($1,7 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); (iv) terminal pneumático fora do núcleo ($1,8 \times 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) e; (v) extrator de nêutrons, para radiografia com nêutrons, colocado sobre o núcleo ($2,0 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) [Tófani (1989)].

Descrição do Extrator de Nêutrons

O canal extrator de nêutrons do reator IPR-R1 é um dispositivo mecânico que possibilita a condução de um feixe de nêutrons, produzidos no núcleo do reator, até a superfície do poço, ao nível do piso. Ele consiste basicamente em um tubo vertical de alumínio, estanque à água, com seções de 10 e 15 cm de diâmetro, fechado em sua extremidade inferior. Essa extremidade é colocada imediatamente acima do anel refletor de grafita e a extremidade oposta, aberta, é utilizada para introdução das amostras a serem analisadas. O dispositivo extrator de nêutrons pode ser movimentado sobre o núcleo do reator através de trilhos instalados com essa finalidade. O tempo de exposição do filme durante os testes não ultrapassou cinco minutos, a um fluxo de nêutrons térmicos de $1,68 \times 10^6 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ e

a uma distância de 3,6 m do núcleo do reator. As dimensões dos objetos a serem inspecionados estão limitadas a 14,5 cm de diâmetro ou comprimento [Amorim (1987)].

Detecção dos Nêutrons

As reações dos nêutrons com o núcleo dos materiais podem ser do tipo espalhamento elástico (n, n) ou espalhamento inelástico (n, n'), nas quais um nêutron continua existindo após cada interação, mas o ângulo de espalhamento remove-o do feixe colimado, conduzindo-o até o detector. Há ainda reações de absorção, tais como a captura radiativa (n, γ) ou aquelas em que uma partícula carregada é produzida após a captura do nêutron (n, α) ou (n, p). Os nêutrons devem produzir alguma radiação secundária que seja facilmente detectável, tal como partículas carregadas ou fótons, porque os nêutrons em si não produzem nenhum efeito direto significativo sobre os detectores. O registro em filme fotográfico exige uma espécie de conversor: tela conversora (uma mistura de absorvedor de nêutrons, material luminescente e um agente fixador) ou tela cintiladora [Walker (1985)].

Aplicação de PDI à Radiografia com Nêutrons

A utilização de PDI [Gonzalez (1987)] permite a revelação de detalhes invisíveis em imagens diretas, tais como pequenos orifícios através da inversão da imagem, defeitos em detectores através de integração de imagens e percepção de ligeiras diferenças de contraste entre imagens de baixo contraste através de subtração das imagens. Pequenos orifícios em uma placa fina de cádmio, p.ex., são mais evidentes em uma imagem inversa do que em uma imagem normal [Reuscher et al. (1990)]. A extração de contornos pode ser efetiva na observação de objetos em movimento. A operação de média de quadros aproveita o caráter aleatório do ruído presente na imagem para aumentar a relação sinal/ruído da mesma: vários quadros da imagem com ruído são somados e a imagem final é dividida pelo número de quadros combinados. As convoluções espaciais são operações sobre grupos de *pixels* que realizam filtragem espacial em uma imagem. Outras convoluções espaciais implementam determinações de gradiente das imagens que, por sua vez, são úteis na identificação de bordas [Fujine et al. (1985)].

As operações de PDI que estão sendo desenvolvidas são as seguintes: (a) Convoluções $N \times M$; (b) Aumento de contraste; (c) Seleção e modificação da tabela de cores; (d) Subtração de fundo; (e) Operações sobre janelas; (f) Histogramas; (g) Reversão; (h) Extração de contornos; (i) Adição, subtração, multiplicação e divisão; (j) Operações lógicas AND,

OR, XOR; (k) Média de quadros; (l) Filtragem; (m) Ampliação, deslocamentos horizontal e vertical de imagens; (n) Sobreposições gráficas; (o) Visualização em pseudo-cores; (p) Integração. As imagens correspondentes às radiografias com nêutrons, registradas em filme fotográfico, são convertidas para a forma digital através de um digitalizador de mesa com resolução de 300 dpi e 256 tons de cinza. Em seguida, essas imagens são submetidas às rotinas de PDI acima relacionadas, de acordo com a análise que se pretende realizar.

Aplicações da Radiografia com Nêutrons

Quanto às aplicações, a radiografia com nêutrons apresenta melhor definição em materiais hidrogenados, como plásticos em geral, separados ou inclusos em metais, materiais biológicos, elementos químicos e isótopos com seções de choque elevadas e em montagens compostas de materiais de diferentes densidades. Do ponto de vista do usuário da radiografia por raios-X, o maior potencial de aplicação da radiografia com nêutrons está na inspeção de materiais leves inclusos em materiais pesados. Em função das características do dispositivo extrator de nêutrons e do reator IPR-R1, a radiografia com nêutrons pode ser empregada para: (a) Detecção de falhas em materiais usados para blindagem neutrônica; (b) Detecção de defeitos na interface entre borrachas e metais; (c) Detecção e localização de borrachas, plásticos, graxas e óleos dentro de peças metálicas; (d) Detecção de falhas em adesivos; (e) Detecção de materiais explosivos em invólucros metálicos.

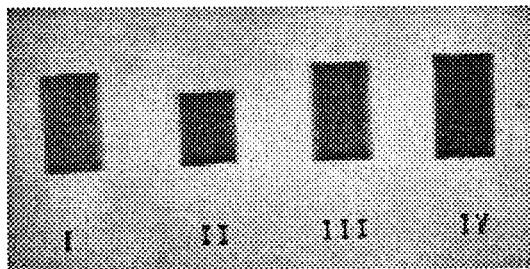
Análise de Desempenho do Sistema

O desempenho do sistema pode ser medido utilizando-se os indicadores de sensibilidade definidos pela ASTM (Sociedade Americana para Testes e Materiais) e através de amostras de cádmio, para cálculo da dimensão de orifícios e de resolução de bordas agudas [Reuscher et al. (1990)]. As seguintes medidas permitem a avaliação do desempenho do sistema radiográfico: (a) Medições do fluxo de nêutrons; (b) Determinação da razão γ /nêutrons; (c) Determinação da razão efetiva comprimento/diâmetro (L/D) do colimador; (d) Determinação da temperatura efetiva dos nêutrons; (e) Determinação da eficiência do colimador e do sistema de captura de imagens através da medição da função de transferência de modulação (MTF).

Resultados Preliminares

A seguir, são apresentadas algumas imagens obtidas através de radiografia com nêutrons, que foram digitalizadas por meio de um digitalizador *ScanJet IIp HP*, de 300 dpi, 256 tons de cinza. A Figura 1

representa a radiografia de quatro pastilhas compactadas de óxido de urânio, diferentemente enriquecidas. O uso de PDI possibilita a medição dessas variações de enriquecimento, pois a probabilidade de uma interação nêutron-núcleo depende do nuclídeo em particular e não exibe uma relação direta com o número atômico, como ocorre na atenuação dos raios-X. Com nêutrons térmicos, o coeficiente de atenuação apresenta grandes variações entre nuclídeos. Desta forma, isótopos diferentes podem apresentar seções de choque muito diferentes e a radiografia com nêutrons pode revelar a distribuição de um isótopo em particular em uma amostra [Walker (1985)], medida a partir do tom de cinza médio de cada amostra.



Pastilha I - Enriquecimento: Urânio Natural
 Pastilha II - Enriquecimento: 1,98% de U-235
 Pastilha III - Enriquecimento: 2,8% de U-235
 Pastilha IV - Enriquecimento: 3,4% de U-235

Figura 1: Radiografia com nêutrons de pastilhas cilíndricas de óxido de urânio compactadas.

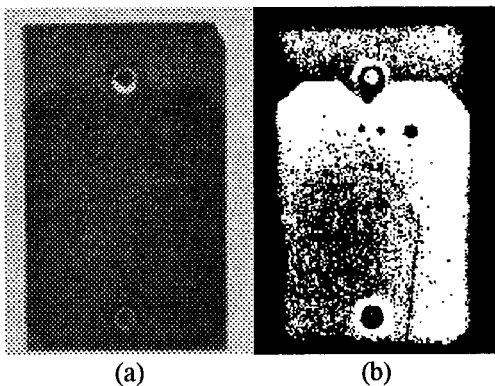


Figura 2: (a) Radiografia com nêutrons de padrão em aço e polietileno; (b) Imagem melhorada com aplicação de rotinas de PDI.

Na Figura 2(a), é apresentada uma radiografia de um padrão construído em aço e polietileno. Esse padrão consiste em uma lâmina de polietileno de 1,3 mm de espessura, com trinca e orifícios, inserida entre duas lâminas de aço (com espessuras de 5 e 10 mm). Na Figura 2(b) é mostrada a aplicação de rotinas de melhoria de contraste, de limiarização e de reversão da imagem para realçar a trinca e os orifícios presentes na lâmina de polietileno.

A Figura 3(a) mostra uma radiografia com nêutrons de um detector *Geiger-Müller* construído com revestimento cilíndrico externo de aço inoxidável e filamento central blindado por um cilindro concêntrico, enquanto que na Figura 3(b), é apresentada essa mesma imagem realçada com aplicação de rotinas de PDI, tendo sido aplicada uma melhoria de contraste seguida de uma extração de contornos.

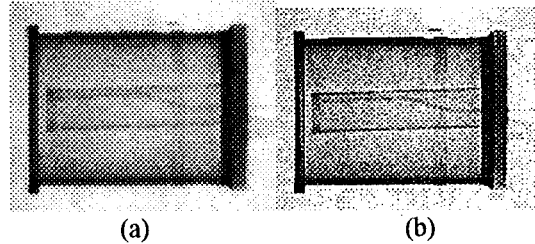


Figura 3: (a) Radiografia com nêutrons de detector *Geiger-Müller* construído com revestimento cilíndrico externo de aço inoxidável e filamento central blindado por um cilindro concêntrico; (b) Imagem realçada com aplicação de rotinas de PDI.

As Figuras 4 e 5 representam radiografias com nêutrons de materiais biológicos, tais como uma folha de hibisco de cerca de 0,2 mm de espessura, submetida a um tempo de exposição ao fluxo de nêutrons de 4 minutos e uma ante-coxa de galinha exposta durante 3,5 minutos, respectivamente.

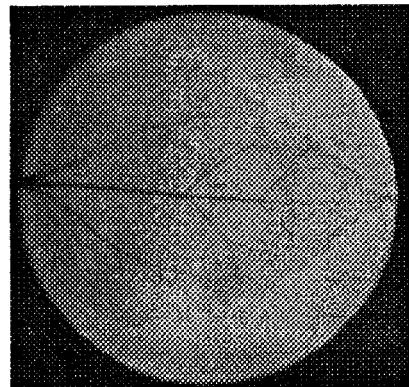


Figura 4: Radiografia com nêutrons de folha verde de hibisco.

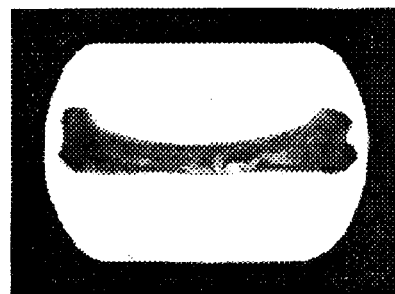


Figura 5: Radiografia com nêutrons de ante-coxa de galinha.

A Figura 6 mostra as radiografias com raios-X e com nêutrons de um projétil calibre 38, onde pode se observar que o exame por raios-X produz uma imagem mais nítida, mas não revela a presença do propelente, a pólvora, no interior do invólucro do projétil.

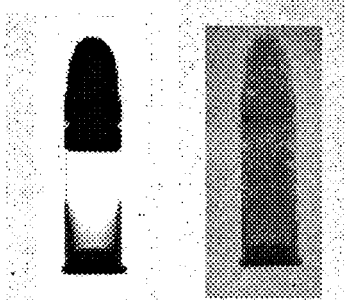


Figura 6: Radiografia com raios-X e radiografia com nêutrons de um projétil calibre 38.

Na Figura 7, são apresentadas uma radiografia com nêutrons e uma radiografia com raio-X de um mesmo conjunto de peças para possibilitar a comparação entre os métodos. Pode-se constatar que os materiais leves, como os plásticos, são transparentes a raio-X, sendo visualizados somente através de radiografia com nêutrons.

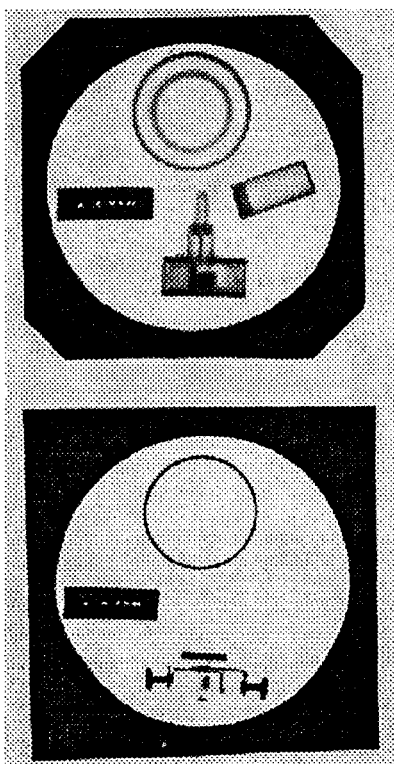


Figura 7: Radiografia com nêutrons e radiografia com raios-X de um conjunto de peças variadas (retentor de borracha, lâmina de cádmio, interruptor de plástico, frasco de polietileno).

Comentários Finais

O sistema de PDI está sendo implementado a partir da plataforma *PHOTOPIX* [Sol (1993)], que utiliza ambiente *MS-Windows* e programação orientada para objetos. Inicialmente, o sistema analisará imagens registradas em filme fotográfico, mas o objetivo final do trabalho é o desenvolvimento de um sistema capaz de capturar e analisar as imagens de radiografias com nêutrons em tempo real.

Referências

- AMORIM, Valter Alves. *Implantação e desenvolvimento da técnica de neutronografia no reator IPR-R1*. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1987. 20p. (Nota Técnica).
- BERGER, Harold. *Neutron radiography; methods, capabilities, and applications*. Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1965. 146p.
- FUJINE, Shigenori, YONEDA, Kenji, KANDA, Keiji. Digital processing to improve image quality in real-time neutron radiography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, Amsterdam, v. 228, n. 2-3, p. 541-548, Jan. 1985.
- GONZALEZ, Rafael C., WINTZ, Paul. *Digital image processing*. 2. ed. rev. Reading: Addison-Wesley, 1987. 503p.
- REUSCHER, J.A., MIDGETT, S.P., WRIGHT, J.W. Real-time neutron radiography at Texas A & M University. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, Amsterdam, v. 299, n. 1-3, p. 434-439, Dec. 1990.
- SOL, Alisson Augusto Souza. *PHOTOPIX: Uma plataforma para sistemas de processamento digital de imagens orientada para objetos*. Belo Horizonte: Instituto de Ciências Exatas da UFMG, 1993. 87p. (Dissertação, Mestrado em Ciência da Computação).
- TÓFANI, P.C.; PAIANO, M.C. *Uses a small research reactor in Brazil*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RESEARCH REACTORS, 1988, Hsinchu. *Proceedings...* (In press).
- WALKER, J. Review: radiography with neutrons. In: *RADIOGRAPHY WITH NEUTRONS*, 1, 1973, Birmingham. *Proceedings...* London: British Nuclear Energy Society, 1975. p. 1-5.