UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Ciência da Computação
Instituto de Ciências Exatas

NEUTRA: UM SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS COM NÊUTRONS

Ailton Fernando Dias

Belo Horizonte
Março de 1994

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Ciência da Computação
Instituto de Ciências Exatas

NEUTRA: UM SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS COM NÊUTRONS

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.
Orientador: Arnaldo de Albuquerque Araújo

Ailton Fernando Dias

Belo Horizonte
Março de 1994

Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear
19/09/94
SEDOTE

D541n
1994

Dias, Ailton Fernando
NEUTRA: um sistema de análise de imagens radiográficas com nêutrons. - Belo Horizonte: UFMG/ICEx, 1994.
179p.

Dissertação (mestrado) UFMG.ICEx

1. Processamento digital de imagens. 2. Radiografia com nêutrons. I. Título

CDU: 681.3

FOLHA DE APROVAÇÃO

NEUTRA: Um Sistema de Análise de Imagens Radiográficas com Nêutrons

AILTON FERNANDO DIAS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

PROF. ARNALDO DE ALBUQUERQUE ARAÚJO - Orientador
DCC - ICEx - UFMG

PROFA. VERGÍNIA REIS CRISPIM Co-orientadora
COPPE/UFRJ

WALDEMAR AUGUSTO DE ALMEIDA MACEDO
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CNEN

Prof. LUCIANO DA FONTOURA COSTA
IFQSC/USP

Belo Horizonte, 03 de março de 1994.

Este trabalho foi realizado com o apoio do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), órgão da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

À memória de meus avós José Dias e Geni Costa Dias.

AGRADECIMENTOS

É uma tarefa difícil, senão impossível, agradecer o auxílio que nos foi prestado para executarmos determinada tarefa sem cometermos graves e imperdoáveis injustiças, pois todos que nos cercam são colaboradores e, de alguma forma, cúmplices de nossas realizações. Seria deselegante, todavia, basear-se no receio de ser injusto para se abster de registrar a gratidão pela atenção, pelo carinho e pelo interesse que colegas, amigos e entes queridos nos dispensaram.

Ao longo da vida, recebemos as mais diversas influências, uma infinidade de possibilidades nos são apresentadas e cada uma das decisões que tomamos pode tornar o nosso futuro dramaticamente diferente do nosso presente e, sempre seremos os únicos responsáveis por nossas próprias escolhas. E seremos melhores, mais completos, mais realizados à medida que nossas escolhas refletirem nossa essência, formada por nossos desejos e nossos talentos, mas fortemente condicionada pelos valores e pelos conceitos que domaram essa essência, originalmente rebelde. Assim, por terem se dedicado e se sacrificado para oferecerem o que de melhor possuíam, conduzindo e mesmo decidindo enquanto não pude fazê-lo, agradeço as escolhas, as lições de disciplina e o amor recebidos de meus pais.

A Universidade Federal de Minas Gerais, a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, através de seus educadores e dos amigos que ali encontrei, contribuíram com grande parte do conhecimento utilizado na elaboração desse trabalho, mas desejo agradecer e homenagear especialmente o Instituto "Coração de Jesus", personalizado pela figura atenciosa e amiga de sua fundadora e diretora, Professora Elza Gonçalves Fabel, pelos valiosos ensinamentos recebidos durante os dez anos que ali estudei.

A qualidade de toda produção científica está estreitamente vinculada a uma orientação segura e atuante, assim, a anuência dos Professores Arnaldo de Albuquerque Araújo e Vergínia Reis Crispim em prestar essa orientação, bem como a atenção e o interesse dispensados foram de inestimável importância. Agradeço ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, na pessoa de seu Superintendente, Doutor Fernando Soares Lameiras, e em especial ao Doutor Paulo de Carvalho Tófani e ao

Engenheiro Luiz Fontoura Lorenzoni, que fizeram inúmeras e imprescindíveis concessões para que eu pudesse aprimorar minha formação acadêmica.

Quanto ao trabalho de revisão e levantamento bibliográficos, nada teria sido possível sem a prestimosa colaboração da equipe da Biblioteca do CDTN e do Centro de Informações Nucleares, em particular da amiga Maria Mabel de Menezes Scotti, que localizou e providenciou grande parte do material bibliográfico consultado. Durante a elaboração e a revisão da dissertação foram sempre valiosas a atenção e as sugestões dos amigos Aimoré Dutra Neto e Orozimbo Josué Carneiro. Agradeço o auxílio do Projetista Sérgio Celeghini Albino, ao confeccionar parte dos desenhos esquemáticos apresentados nesse trabalho. Cabe ressaltar a importante contribuição do Assessor Especializado Valter Alves de Amorim que projetou e construiu o dispositivo radiográfico com nêutrons do CDTN e produziu as primeiras radiografias no reator IPR-R1.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP), que colaboraram na divulgação desse trabalho através do auxílio para participação em congressos.

Por fim, agradeço e, ao mesmo tempo, desculpo-me, a minha esposa, Júnia Barreto, e ao meu filho, Pedro, pelo tempo que lhes roubei sem muita cerimônia. Entretanto, esse tempo, juntamente com o carinho e o amor que recebi são os mais importantes, mais valiosos e mais imponderáveis elementos desse trabalho.

A tentação de sermos espirituosos e concisos pode levar-nos à inverdade. Por mais elegante e resumida que seja, a brevidade nunca pode, pela natureza dos fatos, ter em conta todos os aspectos de uma situação complexa. Ao tratar de um tema com essas características, só se pode ser conciso à custa de omissões e simplificações. A omissão e a simplificação auxiliam-nos a compreender, contudo auxiliam-nos, em muitos casos, a compreender imperfeitamente, pois a nossa percepção pode limitar-se a noções definitivas e abreviadas, sem abarcar a da realidade vasta e ramificada, a partir das quais tais noções foram formuladas de modo bastante arbitrário. Porém, a vida é curta e o conhecimento, ilimitado: ninguém dispõe de tempo para tudo. Na realidade, somos, de um modo geral, forçados a optar entre uma exposição impropriamente breve e a impossibilidade de expor. Sintetizar é um mal necessário, e a tarefa daquele que sintetiza é fazer da melhor maneira possível um trabalho que, embora essencialmente ruim, ainda seja melhor do que nada. Ele deve aprender a simplificar, mas sem chegar ao extremo de falsificar. Deve aprender a concentrar-se no essencial de uma determinada situação, mas sem desconhecer muitos aspectos marginais expressivos da realidade. Assim sendo, pode suceder que ele não esteja capacitado a dizer toda a verdade (porque toda a verdade a respeito de quase todos os assuntos importantes é incompatível com a concisão), mas poderá dizer consideravelmente mais do que as temerárias meias verdades e quartas partes da verdade que sempre foram a moeda corrente do pensamento.

Aldous Huxley

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 **Definição do sistema NEUTRA** 1

1.2 **Motivação** 2

1.3 **Organização do trabalho** 3

2 REVISÃO DA LITERATURA 5

2.1 **Radiografia com nêutrons** 7

2.2 **Processamento de imagens** 28

2.3 **Conclusões** 38

3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS 39

3.1 **Conceitos básicos** 41

3.1.1 Imagem 41
3.1.2 *Pixel* 42
3.1.3 Janela 42
3.1.4 Histograma 42

3.2 **Aquisição de imagens** 43

3.3 **Representação e modelamento de imagens** 44

3.3.1 Digitalização 45
3.3.2 Qualidade das imagens 45

3.4 **Realce de imagens** 46

3.4.1 Transformação da escala de cinza 47
3.4.2 Modelamento histogrâmico 51
3.4.3 Suavização 52
3.4.4 Aguçamento 56
3.4.5 Pseudocoloração 58

3.5 **Restauração de imagens** 59

3.5.1 Modelos de ruído 59
3.5.2 Critérios de fidelidade de imagens 61

3.6 **Análise de imagens** 62

3.6.1 Extração de atributos 62
3.6.2 Detecção de bordas 64
3.6.3 Segmentação de imagens 68
3.6.4 Comparação entre imagens 71

3.7 **Conclusões** 72

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA NEUTRA 73

4.1 **Instalação radiográfica** 74

4.1.1 Reator IPR-R1 74
4.1.2 Reator Argonauta 77
4.1.3 *Imageamento* com nêutrons 79
4.1.4 Digitalização das radiografias 80

4.2 **Analisador de imagens** 83

4.2.1 Plataforma de desenvolvimento 83
4.2.2 Pré-processamento de imagens 85
4.2.3 Filtragem de ruídos 86
4.2.4 Realce de bordas 86
4.2.5 Segmentação de imagens 87
4.2.6 Medidas dimensionais 87
4.2.7 Pseudocoloração e comparação de imagens 88

4.3 **Conclusões** 88

5 RESULTADOS OBTIDOS 89

5.1 **Imagens positivas, registradas em papel fotográfico, capturadas pelo *scanner*** 89

5.2 **Imagens negativas, registradas em filme, capturadas pelo *scanner*** 95

5.3 **Imagens negativas, registradas em filme, capturadas pela câmara de vídeo** 106

5.3.1 Radiografias produzidas no reator IPR-R1 106
5.3.2 Radiografias produzidas no reator Argonauta 106

5.4 **Conclusões** 113

6 CONCLUSÕES 116

6.1 **Desenvolvimentos futuros** 117

6.1.1 Migração para a plataforma *PHOTOPIX* 117
6.1.2 Integração de funções 118
6.1.3 *Imageamento* em tempo real 118

6.2 **Comentários finais** 120

7 ANEXO A - RADIOGRAFIA COM NÊUTRONS 122

A.1 **Fontes de nêutrons** 123

A.1.1 Interação dos nêutrons com a matéria 124
A.1.2 Classificação dos nêutrons 125
A.1.3 Colimação dos nêutrons 127
A.1.4 Aceleradores 128
A.1.5 Fontes radioisotópicas 130
A.1.6 Reatores nucleares 130
A.1.7 Radiografia com nêutrons térmicos 130

A.2 **Detecção de nêutrons** 131

A.2.1 Efeito direto dos nêutrons 133
A.2.2 Materiais conversores 133
A.2.3 Mecanismo de detecção 135
A.2.4 Conversores por cintilação 136
A.2.5 Conversores de gadolínio 137

A.3 **Métodos de *imageamento*** 137

A.3.1 Registradores tela-filme 138
A.3.2 Telas emissoras de fótons 139
A.3.3 *Imageamento* com nêutrons térmicos 140
A.3.4 *Imageamento* por exposição direta 141
A.3.5 *Imageamento* através de exposição por transferência 142
A.3.6 *Imageamento* por *track-etching* 143
A.3.7 *Imageamento* em tempo real 144

A.4 **Aplicações** 145

A.4.1 Aplicações nucleares 146
A.4.2 Aplicações industriais 149
A.4.3 Aplicações biomédicas 151
A.4.4 Aplicações metalúrgicas 151
A.4.5 Aplicações arqueológicas 151
A.4.6 Inspeção de explosivos 151

A.5 Perspectivas 152
A.6 Conclusões 154

GLOSSÁRIO 155

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 160

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA 170

LISTA DE FIGURAS

1 - Fonte de nêutrons distribuída usando reator nuclear 75

2 - Tubo extrator de nêutrons vertical (vista lateral) 75

3 - Vista lateral do dispositivo extrator de nêutrons do reator IPR-R1 76

4 - Vista superior do dispositivo extrator de nêutrons do reator IPR-R1 77

5 - Sistema colimador instalado no canal J-9 do reator Argonauta 79

6 - Digitalização de negativos usando o *ScanJet IIp* 81

7 - Digitalização de negativos usando câmara de vídeo 82

8 - Tela de apresentação do analisador de imagens 84

9 - (a) Indicador de Resolução Visual em aço e polietileno; (b) Desenho do IRV 90

10 - IRV em aço e polietileno após processamento 91

11 - Folha verde de hibisco 92

12 - Ante-coxa de galinha 92

13 - Folha verde de hibisco após processamento 93

14 - Ante-coxa de galinha após processamento 93

15 - Bala de revólver calibre 38 93

16 - Bala de revólver após processamento 94

17 - Pastilhas cilíndricas de óxido de urânio compactadas 94

18 - Pastilhas de óxido de urânio após processamento 95

19 - (a) Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A]; (b) Padrão de iluminação 96

20 - Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A] após processamento 97

21 - (a) Indicador de sensibilidade; (b) Padrão de iluminação; (c) Desenho do indicador 98

22 - Indicador de sensibilidade após processamento 99

23 - (a) BPI segundo a Norma ASTM E-545; (b) Padrão de iluminação; (c) Diagrama do BPI 101

24 - BPI após processamento 102

25 - (a) IRV em alumínio; (b) Padrão de iluminação 103

26 - IRV em alumínio após processamento 103

27 - (a) Estrutura de aeronave do tipo colméia; (b) Padrão de iluminação 104

28 - Estrutura de aeronave do tipo colméia após processamento 104

29 - (a) Placa de alumínio esfoliada; (b) Padrão de iluminação 105

30 - Placa de alumínio esfoliada após processamento 105

31 - Folha verde de hibisco. Originais (a) um quadro; (b) 30 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 30 quadros. 107

32 - Ante-coxa de galinha. Originais (a) um quadro; (b) 30 quadros. Processadas (a) um quadro; (b) 30 quadros 107

33 - Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A]. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros 108

34 - BPI segundo a Norma ASTM E-545. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros 109

35 - IRV em alumínio. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros. 111

36 - Estrutura de aeronave do tipo colméia (um quadro): (a) e (b) Originais; (c) e (d) Processadas 112

37 - Placa de alumínio esfoliada (um quadro): (a) original; (b) processada 112

38 - *Imageamento* em tempo real no reator IPR-R1 119

39 - Montagem para produção das primeiras radiografias com nêutrons, por Kallmann, em 1938. 1) raio iônico; 2) camada de reação; 3) água; 4) canal seco para saída dos nêutrons; 5) camada de boro para absorver nêutrons lentos; 6) abertura para saída de nêutrons lentos; 7) cassete contendo o sistema fotográfico; 8) tela de chumbo de blindagem dos raios-X; 9) objeto.... 124

40 - Fontes de nêutrons pontuais e distribuídas 126

41 - Configurações possíveis de dispositivos extratores de nêutrons com baixa contaminação inerente 128

42 - Efeito da colimação sobre a imagem de uma fenda em um plano absorvedor de nêutrons 129

43 - Geometria do sistema de conversor posterior, ilustrando a conversão do nêutron e a emissão da radiação secundária. 136

44 - *Imageamento* por exposição direta 142

45 - *Imageamento* através de exposição por transferência 143

46 - *Imageamento* eletrônico 145

27 - (a) Estrutura de aeronave do tipo colméia; (b) Padrão de iluminação 104

28 - Estrutura de aeronave do tipo colméia após processamento 104

29 - (a) Placa de alumínio esfoliada; (b) Padrão de iluminação 105

30 - Placa de alumínio esfoliada após processamento 105

31 - Folha verde de hibisco. Originais (a) um quadro; (b) 30 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 30 quadros. 107

32 - Ante-coxa de galinha. Originais (a) um quadro; (b) 30 quadros. Processadas (a) um quadro; (b) 30 quadros 107

33 - Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A]. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros 108

34 - BPI segundo a Norma ASTM E-545. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros 109

35 - IRV em alumínio. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros. 111

36 - Estrutura de aeronave do tipo colméia (um quadro): (a) e (b) Originais; (c) e (d) Processadas 112

37 - Placa de alumínio esfoliada (um quadro): (a) original; (b) processada 112

38 - *Imageamento* em tempo real no reator IPR-R1 119

39 - Montagem para produção das primeiras radiografias com nêutrons, por Kallmann, em 1938. 1) raio iônico; 2) camada de reação; 3) água; 4) canal seco para saída dos nêutrons; 5) camada de boro para absorver nêutrons lentos; 6) abertura para saída de nêutrons lentos; 7) cassete contendo o sistema fotográfico; 8) tela de chumbo de blindagem dos raios-X; 9) objeto.... 124

40 - Fontes de nêutrons pontuais e distribuídas 126

41 - Configurações possíveis de dispositivos extratores de nêutrons com baixa contaminação inerente 128

42 - Efeito da colimação sobre a imagem de uma fenda em um plano absorvedor de nêutrons 129

43 - Geometria do sistema de conversor posterior, ilustrando a conversão do nêutron e a emissão da radiação secundária. 136

44 - *Imageamento* por exposição direta 142

45 - *Imageamento* através de exposição por transferência 143

46 - *Imageamento* eletrônico 145

LISTA DE TABELAS

1 - Características da instalação de radiografia com nêutrons do reator IPR-R1 78

2 - Resultados da segmentação do IRV em aço e polietileno 92

3 - Média e desvio-padrão das pastilhas de óxido de urânio 96

4 - Diâmetro dos cilindros de cobre e de acrílico (digitalização com *scanner*) 97

5 - Resultado da segmentação do indicador de sensibilidade 100

6 - Resultado da segmentação do BPI (digitalização com *scanner*) 102

7 - Dimensionamento das cavidades do IRV em alumínio (digitalização com *scanner*) 105

8 - Diâmetro dos cilindros de cobre e de acrílico (digitalização com câmara de vídeo) 109

9 - Resultado da segmentação do BPI (digitalização com câmara de vídeo) 110

10 - Dimensionamento das cavidades do IRV em alumínio (digitalização com câmara de vídeo) 111

11 - Correspondência entre um sistema típico de radiografia com nêutrons em tempo real e o sistema em desenvolvimento no CDTN 119

12 - Classificação dos nêutrons em função da energia 127

13 - Características das fontes de nêutrons térmicos 131

14 - Características dos materiais intensificadores de imagens fotográficas com nêutrons 134

15 - Detectores para nêutrons epitérmicos 135

16 - Propriedades dos materiais usados em telas conversoras de nêutrons 139

17 - Características de telas conversoras de nêutrons térmicos 141

18 - Sugestões de áreas de aplicação para radiografia com nêutrons térmicos 146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC - *Analog/Digital Converter* (conversor analógico/digital)

AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica

ANL - *Argonne National Laboratory*

API - *Application Programming Interface* (interface para programação de aplicativos)

ART - *Algebric Reconstruction Technique* (técnica de reconstrução algébrica)

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BM - *Bit Map* (mapa de bits)

BPI - *Beam Purity Indicator* (indicador de pureza do feixe)

BRR - *Battelle Research Reactor*

CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

COPPE - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia

CPS - *Component Positioning System* (sistema de posicionamento de componentes)

CPU - *Central Processor Unit* (unidade central de processamento)

CRASI - *Contrast, Resolution And Scatter Indicator* (indicador de espalhamento, resolução e contraste)

DCC - Departamento de Ciência da Computação

DOS - *Disk Operating System* (sistema operacional de disco)

DP - Desvio-Padrão

DSP - *Digital Signal Processor* (processador de sinais digitais)

ECI - Elétron de Conversão Interna

END - Ensaio Não-Destrutivo

HFEF - *Hot Fuel Examination Facility* (instalação para exame de combustível quente)

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEN - Instituto de Engenharia Nuclear

IIS - *Image Interpreting System* (sistema de interpretação de imagens)

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IQI - *Image Quality Indicator* (indicador de qualidade de imagem)

IRV - Indicador de Resolução Visual

JAERI - *Japan Atomic Energy Research Institute*

KUR - *Kyoto University Reactor*

KURRI - *Kyoto University Reactor Research Institute*

L/D - *Length/Diameter* (comprimento/diâmetro)

LIN - Laboratório de Instrumentação Nuclear

LSF - *Line Spread Function* (função de dispersão de linha)

MTF - *Modulation Transfer Function* (função de transferência da modulação)

MTR - *Materials Testing Reactor* (reator de teste de materiais)

NBS - *National Bureau of Standards*

NIS - *Neutron Imaging System* (sistema de *imageamento* com nêutrons)

NR - *Neutron Radioscopy* (radioscopia com nêutrons)

NRAD - *Neutron Radiography*

NSRR - *Nuclear Safety Research Reactor*

PDI - Processamento Digital de Imagens

PML - *Phoenix Memorial Laboratory*

PSBR - *Penn State Breazeale Research Reactor*

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

RAM - *Random Access Memory* (memória de acesso aleatório)

RNTR - Radiografia com Nêutrons em Tempo Real

SDA - Soma das Diferenças Absolutas

SIT - *Silicon Intensifier Target*

SNRS - *Stationary Neutron Radiography System* (sistema estacionário de radiografia com nêutrons)

SSDA - Suavização por Soma das Diferenças Absolutas

SSTD - *Solid-State Track Detector* (detector de traço de estado sólido)

SVGA - *Super Video Graphics Adaptor*

SYQI - *System Image Quality Indicator* (indicador de qualidade de imagem do sistema)

S/R - Sinal/Ruído

TIFF - *Tag Image File Format* (formato de arquivo de imagem rotulada)

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

VCR - *Video Cassete Recorder* (gravador de vídeo cassete)

VESA - *Video Electronics Standards Association*

VISQI - *Visual Image Quality Indicator* (indicador de qualidade visual da imagem)

LISTA DE NOTAÇÕES

$a(i, j)$ - matriz de pesos

b - constante de brilho

c - constante de compressão

$e_{máx}$ - desvio máximo absoluto

ema - desvio médio absoluto

emq - desvio médio quadrático

f_g - nebulosidade geométrica

k - constante de proporcionalidade para o *unsharp masking*

n - nêutron

$p(c)$ - *pixel* central da janela

$p(i)$ - *pixel* situado na i-ésima posição na janela

u - imagem de entrada

v - imagem de saída

v_L - imagem de baixa resolução

v_M - imagem resultante do *unsharp masking*

$v(i, j)$ - valor do *pixel* situado no ponto (i, j)

$\bar{v}$ - valor médio dos *pixels* da imagem

A - área

D_{eq} - diâmetro equivalente

E - esperança matemática

$H_{máx}$ - altura máxima

L - valor máximo dos níveis de cinza

$L_{máx}$ - largura máxima

N - número de *pixels* na imagem

N_W - número de *pixels* na janela ou vizinhança

T - perímetro

$W(i, j)$ - janela ou vizinhança

α - partícula alfa

β - radiação beta

ΔD - variação da densidade óptica do filme radiográfico

$\Delta\Phi$ - variação do fluxo integrado de nêutrons

ϕ - diâmetro (cap. 5)

ϕ_{ter} - fluxo de nêutrons térmicos

Φ - fluxo integrado de nêutrons

γ - radiação gama

σ - seção de choque (cap. 2, ANEXO A)

σ - desvio padrão da imagem (cap. 3, cap. 5)

σ_a - seção de choque de absorção

σ_s - seção de choque de espalhamento

σ_t - seção de choque total

O - redondeza

RESUMO

Este trabalho descreve a aplicação de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) a imagens obtidas através de ensaios radiográficos com nêutrons nos reatores IPR-R1 e Argonauta, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte, e do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, respectivamente. A radiografia com nêutrons é um processo de ensaio não-destrutivo que tem sido investigado desde 1935, sendo empregado em problemas especiais de inspeção, onde não é possível a obtenção de radiografias por raios-X ou raios γ, ou ainda para complementar esses dois métodos, com o fornecimento de detalhes adicionais. O método de obtenção de radiografias com nêutrons baseia-se no registro da imagem produzida por um objeto posicionado entre um fluxo colimado de nêutrons e um conjunto formado por um conversor de nêutrons e um filme radiográfico. 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. A radiografia com nêutrons apresenta melhor definição em materiais hidrogenados - separados ou inclusos em metais, materiais biológicos, elementos químicos e isótopos com elevadas seções de choque e em montagens compostas de materiais de diferentes densidades. O trabalho trata da digitalização, do processamento e da visualização de imagens radiográficas com nêutrons, envolvendo o uso de três subsistemas: uma instalação radiográfica, dispositivos que executam a captura e a manipulação das imagens e a plataforma de *software* que incorpora as funções de PDI. Essas funções foram desenvolvidas a partir da plataforma *PixelWare*, concebida no Departamento de Ciência da Computação (DCC) da UFMG, que requer um *hardware* compatível com IBM-PC, interface gráfica *Super Video Graphics Adaptor* e *Microsoft mouse*. O analisador de imagens compõe-se de funções dedicadas a minimizar os efeitos das degradações inerentes ao processo radiográfico com nêutrons, sendo que essas funções foram agrupadas em seis categorias: (a) pré-processamento; (b) filtragem; (c) realce de bordas; (d) segmentação; (e) cálculo de medidas dimensionais e; (f) pseudocoloração e comparação de imagens. Neste trabalho, limitou-se à digitalização e à análise de imagens radiográficas com nêutrons registradas em filmes radiográficos. Os resultados obtidos foram altamente satisfatórios e fornecem o embasamento conceitual e prático para o desenvolvimento de um sistema de *imageamento* e análise de radiografias com nêutrons em tempo real.

ABSTRACT

This work describes the application of digital image processing techniques to neutron radiographic images. It has been used images produced by two Brazilian nuclear reactors facilities: IPR-R1 and Argonauta reactors, from the Nuclear Technology Development Center, in Belo Horizonte, and from the Institute of Nuclear Engineering, in Rio de Janeiro, respectively. Neutron radiography consists of a non-destructive testing method, investigated for the first time by Kallmann and Kuhn, in 1935, in Germany. It has been applied in special cases of inspection, where it is difficult to take radiographs by X-rays or gamma rays. It can supply additional details, complementing the above methods. Since neutrons and X-rays have substantially different attenuation properties for various energies, the ability of radiography as an analysis method can be widely increased by using them together. The best performance of neutron radiography is achieved when analyzing hydrogenous materials, organic materials or assemblies with components of different densities. Neutron radiography is based on the register of images on photographic films. Objects are placed between a collimated neutron flux and a set converter-film. Collimated neutrons pass through objects and interact with the converter, emitting gamma and beta radiations. These radiations sensitize the film and produce a neutron image. It has been investigated the capture, analysis and visualization of neutron images registered in radiographic films, by using a flat scanner, or a CCD camera and a frame grabber, and an IBM PC compatible microcomputer. The image analyzer contains specific functions to minimize intrinsical degradations of the neutron radiography technique. Six categories of digital image processing routines were developed: (a) image preprocessing (brightness control, contrast enhancement, illumination correction, histogramic equalization); (b) noise filtering (noise cheating, deblurring, spatial filtering, averaging); (c) edge enhancement (unsharp masking, statistical differentiation, gradient and Laplacian operators, linear methods of sharpening); (d) image segmentation; (e) feature extraction; and (f) pseudo coloring and image comparison. These routines were embedded to the *PixelWare* framework, developed at the Computer Science Department of the Federal University of Minas Gerais. NEUTRA system offers conceptual and practical basis to the development of a low cost real-time neutron radiography imaging system by exploring the benefits of digital image processing. The results provided by this work have encouraged us to continue the researches and to enlarge the system capability.

1 INTRODUÇÃO

Não deveis ser místicos passivos ou esváidos ascetas. Não vos deveis tornar-vos sonhadores ou ventoinhas, caindo no cômodo letargo de crer que uma fictícia Providência virá prover-nos até do necessário para viver.

J.J Benítez

1.1 Definição do sistema NEUTRA

O sistema NEUTRA trata do processamento e da análise de imagens radiográficas com nêutrons, envolvendo a utilização de três subsistemas principais: uma instalação radiográfica com nêutrons; dispositivos de aquisição, processamento e visualização de imagens radiográficas e a plataforma de *software* que executa as operações sobre as imagens. As imagens utilizadas nesse trabalho foram produzidas a partir de duas instalações radiográficas com nêutrons: o reator IPR-R1 e o reator Argonauta, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), respectivamente. A captura das imagens registradas em filmes radiográficos é feita por meio de um digitalizador de mesa *Hewlett-Packard, ScanJet IIp* e de uma câmara de vídeo *Sony* DXC-107 acoplada a um *frame-grabber*, enquanto o processamento e a visualização das imagens são realizados em um microcomputador compatível com IBM-PC 386.

O *software* de análise das imagens foi implementado a partir da interface gráfica *PixelWare* (DAVIS JR., 1992) (DAVIS JR. & ARAÚJO, 1992a), desenvolvida no Departamento de Ciência da Computação (DCC), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e incorpora diversas funções de Processamento Digital de Imagens (PDI), classificadas em seis categorias: (a) pré-processamento das imagens, onde se procura corrigir as degradações sofridas durante a captura das mesmas, devidas a problemas de iluminamento e à falta de uniformidade do feixe de nêutrons produzido pelo reator; (b) filtragem de ruídos, onde se procura minimizar os efeitos das degradações inerentes ao processo de registro radiográfico, como pontilhamento e

granularidade do filme; (c) realce de bordas, com o objetivo de corrigir o borramento verificado em imagens radiográficas com nêutrons, devido ao espalhamento ocorrido na interação nêutrons-objeto sob análise; (d) segmentação da imagem, com o objetivo de separar e identificar as diversas partes constituintes das imagens, como distinguir entre objetos e o padrão de fundo da imagem; (e) cálculo de medidas dimensionais, como área, perímetro, distância etc., que são bastante úteis na caracterização de defeitos presentes nos objetos radiografados e (f) pseudocoloração e comparação de imagens, com a finalidade de realçar detalhes nas imagens processadas e detectar alterações sofridas pelas imagens, respectivamente.

A escolha das funções de PDI incorporadas ao analisador de imagens procurou contemplar aquelas funções mais adequadas à minimização dos efeitos das degradações inerentes ao processo radiográfico com nêutrons. Além disso, o sistema permite a incorporação de novas rotinas de PDI, de forma a atender necessidades específicas de ensaios radiográficos.

1.2 Motivação

A radiografia com nêutrons é um processo de Ensaio Não-Destrutivo (END), investigado pela primeira vez por Kallmann e Kuhn, em 1935. Desde a segunda metade da década de 60, com a maior disponibilidade de computadores digitais em centros de pesquisa e em universidades, tem sido pesquisada a aplicação de técnicas de PDI a imagens radiográficas com nêutrons. No Brasil, a radiografia com nêutrons tem sido investigada desde o início da década de 70, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo, no IEN, no Rio de Janeiro e no CDTN, em Belo Horizonte.

A motivação para o desenvolvimento de um sistema de análise de imagens radiográficas produzidas por nêutrons deveu-se à disponibilidade de uma instalação radiográfica com nêutrons no reator IPR-R1 do CDTN, desenvolvida e construída por AMORIM (1987a) e, naturalmente, deveu-se também ao grande potencial de utilização dessa técnica radiográfica em problemas especiais de inspeção, onde não é possível empregar a radiografia por raios-X ou por raios γ. Esse trabalho tem por objetivo estabelecer uma base conceitual e prática para o desenvolvimento de futuras pesquisas em radiografia com nêutrons e, além disso, integra um projeto mais ambicioso, que visa implantar a radiografia com nêutrons em tempo real no reator IPR-R1.

Numa primeira etapa, procedeu-se a uma extensa pesquisa bibliográfica sobre a radiografia com nêutrons e sobre o emprego de técnicas de PDI a imagens produzidas por nêutrons. Em seguida, uma vez caracterizado o sistema radiográfico e identificadas as funções de PDI aplicáveis àquele método de ensaio, foi concebido o analisador de imagens do sistema NEUTRA. A escolha da arquitetura IBM-PC 386 para dar suporte a esse sistema deveu-se à disponibilidade desse equipamento, à possibilidade de migrar futuramente para uma versão mais poderosa da família de microprocessadores *Intel* 80x86 e, por fim, à possibilidade de ser hospedeira de uma arquitetura paralela, como os *transputers*. O uso de uma arquitetura paralela seria de grande importância na implementação de um sistema capaz de executar operações de PDI sobre imagens em tempo real.

1.3 Organização do trabalho

O cap. 2 contém a revisão do material bibliográfico empregado na elaboração dessa dissertação. Essa revisão é apresentada em ordem cronológica, tem como ponto de partida o artigo pioneiro de KALLMANN (1948) e é dividida em dois temas: radiografia com nêutrons e processamento de imagens. O cap. 3 aborda o processamento de imagens, apresentando os seus conceitos básicos e os conceitos referentes à captura, representação e modelamento de imagens. Além disso, são descritas as três classes de funções de PDI mais empregadas no processamento de imagens: o realce, a restauração e a análise de imagens. No cap. 4, é descrito o sistema NEUTRA, quanto às instalações radiográficas e quanto ao analisador de imagens. Nesse capítulo, são descritos os dispositivos radiográficos dos reatores IPR-R1 e Argonauta, as técnicas de registro e de digitalização das imagens, a plataforma de desenvolvimento do analisador e as categorias de funções de PDI incorporadas ao sistema. O cap. 5 contém os resultados obtidos com a aplicação de técnicas de PDI às radiografias produzidas nos reatores IPR-R1 e Argonauta. No cap. 6, encontram-se as conclusões desse trabalho, bem como uma discussão dos futuros desenvolvimentos que poderiam melhorar o desempenho do sistema NEUTRA. Finalmente, no ANEXO A, encontram-se descritos os principais tópicos relacionados com a radiografia com nêutrons, sendo apresentadas as fontes de nêutrons, as técnicas de detecção e conversão de nêutrons, os métodos de *imageamento* com nêutrons, as aplicações dessa técnica radiográfica e, por fim, são relacionadas as perspectivas de futuros desenvolvimentos em radiografia com nêutrons.

Além das **Referências Bibliográficas**, que correspondem ao material efetivamente utilizado na elaboração dessa dissertação, há uma seção com a **Bibliografia Recomendada**, para aqueles interessados em se aprofundar no estudo do PDI aplicado à radiografia com nêutrons. No final desse trabalho, encontra-se uma seção denominada **Glossário**, onde são encontradas as definições dos termos específicos da radiografia com nêutrons e do processamento de imagens.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A radiografia com nêutrons será um método valioso de inspeção, complementar à radiografia por raios-X, pois apresentam contrastes absolutamente distintos e os nêutrons possuem um alto poder de penetração que alcança e até mesmo supera os mais intensos raios-X.

H. Kallmann

Este capítulo trata da revisão da literatura utilizada na elaboração desta dissertação, tendo por objetivo apresentar o material bibliográfico básico sobre radiografia com nêutrons e processamento de imagens considerados isoladamente e sobre a utilização de processamento de imagens em radiografia com nêutrons. O conteúdo e os principais resultados de cada trabalho consultado são descritos de forma sintética e em ordem cronológica, permitindo resgatar o histórico do desenvolvimento desses assuntos. No final deste trabalho, após o item **Referências Bibliográficas**, que contém o material efetivamente consultado, há o item **Bibliografia Recomendada**, que consiste em um levantamento bibliográfico sobre os assuntos acima, onde são listados os documentos consultados, porém não utilizados na elaboração dessa dissertação. A inclusão dessa bibliografia recomendada tem por objetivo possibilitar um maior aprofundamento do estudo da radiografia com nêutrons e do processamento de imagens.

O nêutron foi descoberto por Chadwick, em 1932, mas as primeiras experiências em radiografia com nêutrons foram realizadas por Kallmann e Kuhn, entre 1935 e 1939. Essas experiências, por sua vez, somente foram publicadas após a 2ª Guerra Mundial, em 1948. Após essas pesquisas, houve pouco desenvolvimento das técnicas radiográficas com nêutrons até que a equipe de pesquisadores do *Argonne National Laboratory* (ANL), nos Estados Unidos da América (EUA), retomassem esses trabalhos, na década de 60. Harold Berger foi um dos principais investigadores do ANL, tendo publicado diversos trabalhos sobre radiografia com nêutrons, onde são discutidos os métodos de *imageamento*, os tipos de conversores e fontes de nêutrons e o potencial de aplicação da radiografia com nêutrons como um método de Ensaio Não-Destrutivo (END).

No início da década de 70, destacaram-se os trabalhos de Hawkesworth e de Harms, da *University of Birmingham*, no Reino Unido, e da *McMaster University*, no Canadá, respectivamente. Hawkesworth pesquisou a utilização de filmes *Polaroid* no *imageamento* de radiografias com nêutrons, enquanto Harms desenvolveu um excelente estudo sobre a resolução espacial obtida através do método fotográfico. Outro grande pesquisador da década de 70 foi Barton, da *Oregon State University*, EUA, que, como Berger, publicou vários trabalhos, enfatizando o potencial da radiografia com nêutrons como técnica de END, complementar à radiografia por raios-X.

A década de 80 assistiu ao surgimento de um novo centro de excelência em radiografia com nêutrons, o *Kyoto University Reactor Research Institute* (KURRI), em Osaka, no Japão. Fujine, Yoneda e Kanda são alguns dos nomes mais conhecidos do KURRI, sendo que seus trabalhos se concentraram no *imageamento* de Radiografias com Nêutrons em Tempo Real (RNTR) e na aplicação de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) às radiografias obtidas com nêutrons.

No Brasil, as pesquisas em radiografia com nêutrons, produzidos a partir de reatores de pesquisa, têm sido realizadas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo, no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, e no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte. Os primeiros estudos sobre a implantação da técnica radiográfica com nêutrons nesses Institutos datam do início da década de 70. No IEN, os arranjos experimentais para extração de nêutrons foram construídos em 1972, e a partir de 1973 centenas de radiografias com nêutrons foram obtidas. No IPEN e no CDTN, as primeiras radiografias com nêutrons somente foram obtidas a partir da década de 80.

A aplicação de técnicas de PDI às imagens obtidas através da radiografia com nêutrons, com a finalidade de melhorar a qualidade das imagens, tem sido uma aspiração comum a todos que se dedicam a essa técnica de END. A partir da segunda metade da década de 70 surgiram os primeiros laboratórios dotados de instalações e equipamentos com essa finalidade. Todavia, somente com o advento dos microcomputadores, na década de 80, com capacidades de processamento e de armazenamento similares ou mesmo superiores aos sistemas computacionais (*mainframes*) da década anterior, é que o PDI pôde ser amplamente empregado na radiografia com nêutrons. Foram relacionados aqui trabalhos que tratam da aplicação de PDI às técnicas radiográficas de inspeção, bem como aqueles que abordam os fundamentos básicos do processamento de imagens, contendo a descrição das principais funções de PDI, como suavização, aguçamento, extração de contornos, operações lógico-aritméticas etc.

2.1 Radiografia com nêutrons

As primeiras experiências bem-sucedidas em radiografia com nêutrons foram realizadas por Kallmann e Kuhn, entre 1935 e 1939. Todavia, as primeiras radiografias, obtidas em 1938, somente foram publicadas em 1948 por questões raciais, uma vez que o Dr. Kallmann possuía origem judia e trabalhava no *Kaiser Wilhelm Institut für Physikalische und Elektrochemie*, em Berlim (KALLMANN, 1948). Quatro métodos fotográficos para detecção de nêutrons foram descritos por Kallmann: (a) reação de nêutrons lentos com boro e lítio, onde a absorção dos nêutrons produz a emissão de partículas de alta energia, capazes de sensibilizar a emulsão fotográfica; (b) em lugar de se utilizar substâncias que emitiam partículas carregadas pesadas, utilizaram-se substâncias que emitiam elétrons *diretamente* (p. ex. gadolínio) ou através de *decaimento radioativo* (p. ex. prata, índio) após a absorção dos nêutrons; (c) utilização de substâncias que emitiam radiação γ quando bombardeadas com nêutrons lentos (p. ex. cádmio); (d) reação entre nêutrons rápidos e nuclídeos livres (p. ex. hidrogênio, na forma de parafina), onde a emulsão fotográfica podia ser sensibilizada diretamente ou por meio de uma tela fluorescente. Os feixes de nêutrons e os raios-X foram comparados, quanto a sua eficiência na produção de radiografias, em função de sua capacidade de sensibilizar emulsões fotográficas e da absorção que sofriam em diversos materiais. Dois aspectos importantes foram discutidos por Kallmann: métodos de produção de imagens de boa nitidez e técnicas de supressão de radiações indesejadas. A partir dos resultados experimentais, foi possível concluir que embora as radiografias com nêutrons não pudessem ser comparadas, em termos da qualidade das imagens obtidas, com as radiografias por raios-X, os nêutrons apresentavam um grande potencial como método complementar aos raios-X, devido às diferenças de absorção e contraste oferecidos, possuindo um poder de penetração que, em alguns casos, se igualavam e mesmo superavam os feixes mais intensos de raios-X.

Em 1962, no *Argonne National Laboratory* (ANL), EUA, foi desenvolvido um método para inspeção não-destrutiva de elementos combustíveis irradiados de reatores nucleares. Devido à natureza altamente radioativa dos objetos a serem inspecionados, não seria possível empregar a radiografia com raios-X, tendo sido utilizada a radiografia com nêutrons. Esse método, empregando telas detectoras metálicas de prata, disprósio e índio, mostrou-se capaz de revelar alterações dimensionais e defeitos nas pastilhas combustíveis, bem como a localização de termopares e outros componentes dentro dos elementos combustíveis. A resolução e o contraste obtidos foram comparáveis àqueles obtidos por radiografias com raios-X (BERGER & BECK, 1963a).

Berger, em 1962, determinou, experimentalmente, a capacidade de diversos métodos de detecção de imagens de radiografias com nêutrons térmicos de produzir radiografias de alto contraste. As comparações entre as diferentes técnicas de *imageamento* foram feitas após otimizar cada uma das técnicas, de forma a obter a melhor resolução possível. Os testes para determinação da resolução foram realizados analisando-se radiografias de uma placa de cádmio contendo orifícios, cujo espaçamento entre si decrescia continuamente. Esses experimentos foram realizados no reator CP-5 do ANL, utilizando-se um feixe de nêutrons paralelo, monocromático, de $3 \times 10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, com baixo conteúdo de radiação γ. Dentre os métodos de detecção testados, os que produziram a melhor resolução para imagens com nêutrons térmicos, utilizando o método direto, foram as telas de gadolínio metálico, uma tela espessa de fluoreto de lítio enriquecido (^{6}LiF) pulverizado e um cintilador fino de ^{10}B, ZnS(Ag) (boro, sulfeto de zinco e prata). As telas de ouro produziram a melhor resolução dentre os métodos de exposição por transferência estudados. As comparações entre tempos de exposição e resolução contidas nesse trabalho são de grande utilidade na determinação da técnica de detecção a ser empregada nas diferentes aplicações do *imageamento* com nêutrons (BERGER, 1963b).

Dando continuidade aos experimentos acima, em 1963, foi desenvolvido um método para determinação da queima de cádmio em varetas de controle de reatores nucleares utilizando a radiografia com nêutrons. Esse método foi aplicado no exame do padrão de queima de uma vareta de controle do reator CP-5, do ANL, tendo sido obtida uma imagem detalhada do padrão de queima, revelando uma região de transição bastante brusca. O controle do reator CP-5 era feito através de varetas de controle contendo cádmio, sendo que, quando essas varetas eram submetidas a um fluxo intenso de nêutrons por um longo período, a maior parte do cádmio enriquecido (^{113}Cd) com alta seção de choque era convertida em isótopos com baixa seção de choque, reduzindo drasticamente a eficiência dessas varetas no controle do reator. A radiografia com nêutrons permitiu a obtenção de resultados comparáveis àqueles obtidos através de análises químicas e espectrometria de massa, métodos tradicionalmente empregados nesse tipo de exame (BERGER *et al.*, 1964).

Tendo por base as pesquisas em radiografias com nêutrons realizadas no ANL, Berger preparou um livro (BERGER, 1965) para "satisfazer parte da demanda crescente por informações sobre radiografia com nêutrons". Com esse livro, Berger procurou atender a três grupos: (a) usuários de radiografias com raios-X e raios γ desejosos de se manterem atualizados quanto ao desenvolvimento desse novo campo

radiográfico; (b) pesquisadores que enfrentassem difíceis e pouco usuais problemas de inspeção, que se interessassem pelo método com nêutrons; (c) cientistas e engenheiros nucleares interessados no *imageamento* com nêutrons.

Esse livro é composto por sete capítulos, organizados da seguinte forma: (a) no Cap. I, há uma descrição sucinta do método radiográfico, bem como um histórico da radiografia com nêutrons a partir da descoberta do nêutron por Chadwick, em 1932; (b) no Cap. II, são apresentados os tipos de fontes de nêutrons disponíveis e é discutida a classificação dos nêutrons em função de suas energias; (c) no Cap. III, é descrito o registro fotográfico de radiografias com nêutrons e os principais tipos de detectores utilizados para esse fim; (d) no Cap. IV, são discutidos os métodos de detecção não-fotográficos de imagens com nêutrons, destacando-se o *imageamento* em tempo real; (e) no Cap. V, encontram-se descritos os métodos recomendáveis para a obtenção de radiografias com nêutrons térmicos, discutindo-se as características desejáveis de um feixe de nêutrons térmicos e os métodos fotográficos mais adequados; (f) no Cap. VI, são discutidas as potencialidades e as limitações da radiografia com nêutrons; (g) no Cap. VII, encontram-se relacionadas as possíveis áreas de aplicação da radiografia com nêutrons, além de diversos exemplos de radiografias obtidas em vários laboratórios.

No *Battelle Memorial Institute*, Columbus, EUA, em 1966, foi desenvolvida uma técnica para utilização de radiografias com nêutrons na inspeção de materiais radioativos. As radiografias com nêutrons foram obtidas utilizando-se uma técnica na qual as amostras radioativas eram desembaladas de seus invólucros, radiografadas no *Battelle Research Reactor* (BRR) e novamente embaladas, sendo que todas essas operações foram realizadas sob a água, uma vez que a piscina do reator foi utilizada como blindagem biológica. Os experimentos permitiram comprovar a eficiência do método na inspeção de pastilhas combustíveis revestidas, permitindo a detecção de fraturas, dilatações (inchamento), deslocamentos e granulações nessas pastilhas. Essa técnica permitiu uma reprodução em tamanho real da área sob inspeção, o que possibilitou a realização de medidas dimensionais úteis na análise do desempenho do experimento. O uso da piscina do reator como blindagem biológica evitou a necessidade de construção de uma blindagem adicional para manipulação segura de amostras altamente radioativas (CARBIENER, 1966).

O desenvolvimento de um tubo intensificador de imagens de nêutrons térmicos, pela *Rauland Corp.* e pelo ANL, tornou possível a instalação de um sistema de *imageamento* sensível a nêutrons térmicos. Berger implantou um sistema capaz de observar objetos em movimento, com uma resolução de 0,5 *mm*. A baixa sensibilidade

do sistema a radiações γ de alta energia possibilitou a inspeção de materiais radioativos (BERGER, 1966). Nesse sistema, foram empregados um tubo *Vidicon*, uma câmara *Kintel* 20/20, lentes *Switar* f/1.4 de 2,5 *cm* de comprimento focal e um monitor de vídeo *Kintel*.

Os cintiladores de nêutrons, em 1969, eram considerados a classe mais importante de detectores de nêutrons, por ser o método de detecção mais veloz disponível até então. Esses cintiladores, que se dividem em cintiladores granulares e cintiladores vítreos, devem ser otimizados quanto à sua espessura a fim de apresentarem um bom desempenho no *imageamento* com nêutrons, pois a espessura do cintilador influencia a absorção de nêutrons, quanto à resolução espacial e quanto às propriedades de emissão de luz. Spowart, da *United Kingdom Atomic Energy Agency*, discutiu a otimização desses parâmetros e, utilizando feixes de nêutrons térmicos e epitérmicos, demonstrou a relevância dessa otimização em aplicações práticas da radiografia com nêutrons (SPOWART, 1969).

A resolução espacial que pode ser obtida através de radiografias com nêutrons foi investigada por Harms e Garside, da *McMaster University*, Canadá, em 1970, tendo sido desenvolvido um modelo analítico do processo de registro de radiografias com nêutrons. O objetivo desse modelo consistiu na determinação de uma função de transmissão de nêutrons de um dado objeto, tendo sido considerado o caso de uma exposição direta em que um fluxo colimado de nêutrons colide com tal objeto. Considerou-se que a resposta do filme era proporcional ao fluxo incidente e que a radiação secundária estava sujeita à lei do inverso dos quadrados, sendo atenuada exponencialmente. Através desse modelo, pôde-se observar um aumento na resolução em função da diminuição da espessura do filme e concluiu-se que o aumento da resolução depende do aumento do tempo de exposição (HARMS & GARSIDE, 1970).

A radiografia com nêutrons teve a ampliação de seu domínio de aplicações prejudicada pela dificuldade de acesso às principais fontes de nêutrons, os reatores nucleares, por questões de segurança (projetos secretos) e pela dificuldade de transporte dos objetos a serem analisados até as instalações radiográficas. Foi essa dificuldade de transporte que motivou Vu Hong, da *Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble*, França, a pesquisar as condições ótimas de utilização de um pequeno acelerador de partículas como fonte de nêutrons e de um sistema de detecção para obtenção de radiografias com nêutrons de qualidade industrial, para aplicação em ensaios não-destrutivos (VU HONG, 1971).

Hawkesworth, da *University of Birmingham*, Reino Unido, investigou, em 1970, as propriedades dos métodos de registro de imagens com nêutrons, utilizando os filmes *Polaroid* rápidos dos tipos 57 (ASA 3000) e 52 (ASA 400) e as telas intensificadoras de luz NE-421 (granular) e NE-905 (vidro). Nessas experiências, foi utilizado o feixe vertical de nêutrons térmicos A1 do reator *Herald*, em Aldermaston, Reino Unido, e as densidades dos filmes foram medidas por reflexão, registradas por um densitômetro. Uma das principais fontes de erros nessas experiências foi a imprecisão do tempo de revelação, da ordem de 15 *s*. Foi possível concluir que o filme do tipo 57, utilizado com a tela intensificadora NE-421, produziu as imagens de melhor resolução e com o menor tempo de exposição, sendo particularmente adequados para feixes de nêutrons térmicos de baixa intensidade (HAWKESWORTH, 1971).

A equipe de pesquisadores da *Aerotest Operations*, EUA, estabeleceu, em 1971, um programa de pesquisas teóricas e experimentais com a finalidade de desenvolver um dispositivo radiográfico com nêutrons para aplicação comercial, com grande capacidade de produção e de alta resolução. As diretrizes básicas desse programa consistiam em obter um sistema simples, compacto, robusto, de baixo custo e imune a ruídos. Foram pesquisados também um método confiável para medição de contraste e espalhamento e um indicador eficiente de resolução. Tomlinson e Newacheck publicaram um trabalho onde é descrito o desenvolvimento do indicador *Contrast, Resolution and Scatter Indicator* (CRASI - indicador de espalhamento, resolução e contraste) durante a execução desse programa. O CRASI foi empregado na otimização do tempo de exposição *versus* contraste, tempo de revelação *versus* contraste e temperatura do revelador *versus* contraste (TOMLINSON & NEWACHECK, 1971).

O método para determinação da resposta de um filme radiográfico, empregando-se uma borda aguda como objeto de teste, é denominado função de dispersão da borda (LSF - *Line Spread Function*). Harms *et al.*, da *McMaster University*, Canadá, examinaram analítica e computacionalmente a LSF, com a finalidade de determinar os efeitos da variação de determinados parâmetros de um sistema de *imageamento* com nêutrons. Além disso, observações experimentais da LSF foram descritas e comparadas com os prognósticos do modelo matemático. Esses experimentos foram realizados utilizando-se o reator nuclear da *McMaster University*, que possui um tubo vertical de 2,5 *cm* de diâmetro para extração dos nêutrons, instalado sobre o núcleo do reator, na posição correspondente à de uma vareta combustível. A razão comprimento/diâmetro (L/D - *Length/Diameter*) para esse extrator era igual a cerca de 390 e o fluxo de nêutrons no plano do objeto sob análise era de aproximadamente

$5 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. A importância de se conhecer precisamente o comportamento da função resolução de um sistema radiográfico, em termos da variação de seus parâmetros, reside na possibilidade de se melhorar a resolução desse sistema através da aplicação de técnicas de processamento de imagens (HARMS *et al.*, 1972).

Em 1972, Harms *et al.*, investigaram, na *McMaster University*, a densidade óptica obtenível com conversores finos de gadolínio em um sistema de *imageamento* radiográfico com nêutrons, a partir de três ações: (a) medição da densidade óptica para conversores de gadolínio de até 5×10^{-3} *μm* de espessura; (b) comparação entre resultados experimentais e previsões teóricas; (c) demonstração da contribuição do espalhamento posterior à densidade óptica, devido à utilização de um segundo conversor (*converter-foil backing material*). O modelo matemático desenvolvido indicou uma dependência exponencial entre a densidade óptica e a espessura do conversor. Os resultados experimentais, para conversores de espessuras entre 5×10^{-3} *μm* e 25 *μm*, obtidas através do extrator vertical de nêutrons do reator nuclear da *McMaster University*, aproximaram-se bastante da previsão teórica, o que confirmou a precisão do modelo matemático adotado. Observou-se, ainda, que a densidade óptica é dependente do espectro de energia dos nêutrons (HARMS *et al.*, 1973).

Como introdução aos anais da conferência sobre radiografia com nêutrons, realizada em 1973, pela Sociedade Britânica de Energia Nuclear, em Birmingham, Walker, da *University of Birmingham*, publicou um trabalho onde são revistos os princípios básicos da radiografia com nêutrons (WALKER, 1975). Nesse trabalho, são discutidas as peculiaridades da interação dos nêutrons com a matéria que possibilitam a radiografia com nêutrons e as propriedades desejáveis das fontes de nêutrons e dos detectores de imagens para obtenção de radiografias de boa qualidade.

Aliaga-Kelly e Nicoll, da *Nuclear Enterprises Ltd.*, Reino Unido, descreveram em 1975, as telas cintiladoras empregadas em radiografia com nêutrons (ALIAGA-KELLY & NICOLL, 1975). Nesse trabalho, são apresentados os dois principais tipos de telas conversoras pesquisadas naquele momento: (a) uma mistura de ^{6}Li e ZnS(Ag) em uma matriz de material plástico de origem orgânica, de aproximadamente 0,4 *mm* de espessura; (b) um vidro de ^{6}Li com cério ativado de cerca de 1 *mm* de espessura. Os autores enfatizam a importância de se utilizar materiais de alta pureza na fabricação de cintiladores.

Segundo Laporte (LAPORTE, 1975), na França, em 1975, todos os reatores de pesquisa do tipo piscina já se encontravam equipados com dispositivos para

radiografia com nêutrons de materiais irradiados, usando o método por transferência. Para atender às necessidades de ensaios industriais na França, foram construídas duas instalações onde se empregava o método direto: uma no *Centre d'Études Nucléaires de Grenoble*, usando os reatores *Melusine* e *Siloette* e outra no *Centre d'Études Nucléaires de Fontenay-aux-Roses*, na região de Paris, usando o reator TRITON I. A radiografia com nêutrons vinha sendo utilizada naquelas indústrias onde os ensaios quantitativos e qualitativos já eram amplamente empregados. As quatro áreas industriais que mais empregavam a radiografia com nêutrons eram: fabricação de dispositivos pirotécnicos, compostos de plásticos e similares, combustíveis e lubrificantes, e metalurgia. Laporte alertava que a maioria das aplicações requeria alta definição das imagens obtidas, o que só poderia ser conseguido a um tempo de exposição aceitável, explorando o alto fluxo de nêutrons e a boa colimação oferecidos pelos reatores nucleares.

No Reino Unido, as primeiras radiografias com nêutrons foram obtidas em 1956, por Thewlis. Matfield, em 1975, relacionou as principais aplicações de radiografias com nêutrons no Reino Unido até aquele ano. As aplicações foram divididas em aplicações industriais, nucleares, militares, arqueológicas e médicas (MATFIELD, 1975). Nesse artigo, encontram-se relacionadas algumas possíveis aplicações futuras, tais como: (a) experimentos com reatores operando no modo pulsado, tornando possível a visualização e o registro de situações dinâmicas; (b) utilização de nêutrons frios para análise de seções espessas de aço; (c) utilização da técnica *track-etch*[1] em radiografia com nêutrons térmicos; (d) desenvolvimento de fontes transportáveis de nêutrons térmicos, tornando possível a construção de um dispositivo *off-the-shelf* para radiografia com nêutrons.

Os pesquisadores da *Australian Atomic Energy Commission Research Establishment*, Wall e Gillespie, publicaram, em 1975, os resultados de seus experimentos em radiografia com nêutrons no reator *Moata*, em Lucas Heights. Esse reator, do tipo *Argonauta UTR* de 100 *kW*, produzia um fluxo máximo de nêutrons térmicos de $1{,}4 \times 10^7\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. As radiografias foram obtidas com o reator operando a 10 *kW* (fluxo térmico de $1{,}4 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$), submetendo-se um filme do tipo *Kodak R* (*SR 54*), de emulsão simples, a uma exposição de 20 minutos. Com a finalidade de demonstrar a utilidade da radiografia com nêutrons como método de END, vários objetos foram radiografados com nêutrons e com raios-X, comprovando-se a superioridade do método com nêutrons na inspeção de materiais não-metálicos inclusos ou montados nò interior de objetos metálicos (WALL & GILLESPIE, 1975).

[1] ver *Imageamento* por *track-etching*, ANEXO A.

Como introdução ao *Symposium on Practical of Neutron Radiography and Gaging*, patrocinado pelo *National Bureau of Standards* (NBS), em Gaithersburg, EUA, em 1975, Barton, da *Oregon State University*, EUA, publicou um trabalho com o objetivo de abordar os princípios básicos da radiografia com nêutrons e o estado da evolução dessa técnica naquela época (BARTON, 1976). Barton fêz um retrospecto do desenvolvimento da radiografia com nêutrons e suas tendências futuras, apresentando as técnicas e as aplicações mais importantes desse método de ensaio.

Alger e Bull, da *University of Columbia*, EUA, pesquisaram a determinação quantitativa dos fatores que influenciam a qualidade da imagem obtida por um sistema radiográfico com nêutrons térmicos, utilizando a função de transferência de modulação (MTF - *Modulation Transfer Function*). Uma das principais vantagens de se utilizar essa técnica é que o desempenho de qualquer sistema complexo pode ser avaliado pelo produto do desempenho de seus componentes considerados isoladamente. A MTF, para diversas combinações filme-conversor, foi determinada através de três métodos: (a) medição da resposta a borda aguda; (b) medição da LSF; (c) medição da resposta a onda quadrada (ALGER & BULL, 1975).

Berger, do NBS, publicou um trabalho sobre os métodos de detecção empregados em radiografia com nêutrons, descrevendo suas características em termos de condições de exposição, resolução espacial e contraste. Dentre os métodos de *imageamento* com nêutrons descritos, estão o filme fotográfico direto e por transferência, visualização em tempo real, *track-etch*, célula de gás e termoluminescência, sendo dada maior ênfase aos métodos com filme fotográfico (BERGER, 1976).

Okawara e Harms, da *McMaster University*, Canadá, investigaram, em 1976, o emprego da radiografia com nêutrons no estudo de processos dinâmicos. O objetivo desse trabalho foi elucidar e analisar alguns aspectos de *imageamento*, associados com o exame radiográfico de fenômenos transientes rápidos com nêutrons. No estudo desses transientes rápidos, foram empregados dois métodos de *imageamento*: (a) por conversores ressonantes e (b) por integração de energia. A partir da análise de vários conversores ressonantes, pôde-se comprovar a viabilidade prática e a boa resolução temporal que apresentam. O formalismo matemático desenvolvido para o método de *imageamento* por integração de energia produziu resultados compatíveis com aqueles obtidos experimentalmente e pode ser usado na determinação da nitidez de imagens de fenômenos transientes rápidos (OKAWARA & HARMS, 1976).

A edição de junho de 1977 da *Atomic Energy Review* (ATOMIC, 1977) foi totalmente dedicada à radiografia com nêutrons, contendo oito artigos que tratam dos seguintes assuntos: (a) desenvolvimento tecnológico da radiografia com nêutrons; (b) processos físicos e métodos matemáticos em radiografias com nêutrons; (c) equipamentos e métodos para radiografia com nêutrons; (d) inspeção radiográfica de combustíveis nucleares usando nêutrons; (e) estudos de transporte de hidrogênio utilizando radiografias com nêutrons; (f) aplicações da radiografia com nêutrons nos EUA; (g) aplicações da radiografia com nêutrons em Metalurgia e; (h) futuro da radiografia com nêutrons.

Como introdução à revista supra-citada, os pesquisadores do NBS, Garrett e Berger, publicaram um trabalho sobre o desenvolvimento tecnológico da radiografia com nêutrons, onde há uma comparação entre os métodos mais comuns de END e os seguintes tópicos são abordados: descoberta do nêutron, propriedades do nêutron, classificação dos nêutrons em função da energia, atenuação dos nêutrons pela matéria, história da radiografia com nêutrons e técnicas para radiografia com nêutrons. Dentre as novas tendências da radiografia com nêutrons, os autores destacaram: (a) aplicação para detecção de corrosão em aeronaves; (b) desenvolvimento de fontes transportáveis de nêutrons térmicos, empregando principalmente o isótopo ^{252}Cf; (c) desenvolvimento de sistemas de *imageamento* em tempo real, empregando integração eletrônica de imagens, para inspeção de grandes objetos, como componentes de aeronaves; (d) radiografia tridimensional (GARRETT & BERGER, 1977).

O estudo dos processos físicos e dos métodos matemáticos relacionados com a radiografia com nêutrons possibilita a melhoria do projeto de sistemas radiográficos com nêutrons e a introdução de uma metodologia preditiva para a determinação da qualidade de imagens radiográficas (HARMS, 1977). Harms, da *McMaster University*, Canadá, publicou em 1976, como Professor Visitante no *Atominstitute Wien*, Áustria, um trabalho revendo aspectos básicos de Neutrônica, parâmetros de sistemas radiográficos e características de imagens obtidas por radiografia com nêutrons. Nesse trabalho, procurou-se enfatizar os princípios básicos e os fenômenos mais relevantes, citando as referências sobre o assunto. Dentre as possíveis áreas de pesquisa, o autor cita as seguintes: (a) identificação de emissores apropriados de radiações secundárias; (b) aplicação de métodos matemáticos no estudo de objetos não-regulares; (c) desenvolvimento de métodos e técnicas para multiplicação da radiação secundária e para melhoria da imagem.

Hawkesworth, da *University of Birmingham*, Reino Unido, publicou, em 1977, um artigo focalizando aspectos práticos da radiografia com nêutrons. Inicialmente, o autor discute a produção de um feixe de nêutrons de qualidade radiográfica, abordando os três tipos de fontes de nêutrons disponíveis: (a) reatores nucleares; (b) aceleradores e (c) radioisótopos, com a intenção de enfatizar as vantagens e desvantagens de se utilizar cada um deles. Os métodos de registro de imagens de nêutrons são discutidos, com ênfase nos métodos que usam o par tela conversora-filme. Finalmente, são descritos alguns métodos de avaliação da qualidade das imagens obtidas por radiografia com nêutrons (HAWKESWORTH, 1977).

Os primeiros experimentos e aplicações da radiografia com nêutrons na inspeção de pastilhas e elementos combustíveis de reatores nucleares, antes e depois de serem irradiados, ocorreram durante a década de 60 e no início da década de 70. Com o objetivo de preencher a lacuna existente na literatura sobre esse assunto, entre os primeiros experimentos e aqueles realizados ao longo da década de 70, Ross, da *Atomic Energy of Canada*, relacionou as atividades em radiografia com nêutrons que vinham sendo realizadas em laboratórios de diversos países, envolvendo combustíveis nucleares irradiados e não-irradiados para reatores térmicos e rápidos. Por se tratar de uma técnica de inspeção já madura naquela época, o autor considerou difícil predizer os seus futuros desenvolvimentos, mas, ainda assim, citou: (a) uso de *laminografia* tridimensional com nêutrons epitérmicos, para inspeção de montagens multi-elementos de reatores térmicos e rápidos e (b) uso de radiografia com nêutrons rápidos *in situ*, durante a simulação de condições transientes em acidentes com combustíveis nucleares (ROSS, 1977).

A seção de choque corresponde ao efeito da interação do nêutron com a matéria. Partindo dessa afirmação, Rauch e Zeilinger, do *Atominstitute der Österreichischen Universitäten*, Áustria, apresentaram a seção de choque do hidrogênio e sua dependência da energia do nêutron incidente como uma característica da interação do nêutron com compostos e isótopos do hidrogênio (RAUCH & ZEILINGER, 1977). Foi demonstrado que a *deuteração* e as diferentes alterações moleculares do hidrogênio afetam sua seção de choque e a atenuação do feixe de nêutrons. O método radiográfico com nêutrons foi comparado com outras técnicas usadas na detecção de hidrogênio, tendo sido desenvolvida uma descrição formal para o processo de difusão. Além da medição da difusão mútua de líquidos *deuterados* e hidrogenados, o efeito da seção de choque dependente da estrutura pode ser usado para detectar transformações moleculares dependentes do tempo. Utilizando filmes de resposta rápida e fontes pulsadas de nêutrons é possível observar fenômenos dinâmicos que ocorrem em tempos

da ordem de 10 *ms*. Através da radiografia com nêutrons, pode-se observar o efeito da condensação de substâncias hidrogenadas e a influência de vários catalisadores em reações químicas.

Tomlinson, da *Aerotest Operations, Inc.*, EUA, publicou, em 1977, um artigo descrevendo o estado-da-arte das aplicações industriais da radiografia com nêutrons nos EUA naquela época. O autor constatou que, desde o final da década de 60, a radiografia com nêutrons deixou de ser uma curiosidade de laboratório para se transformar em uma importante ferramenta de END, amplamente utilizada na indústria. Até então, essa técnica vinha sendo limitada pela necessidade de desenvolvimento de novos materiais, tais como conversores de imagens de gadolínio. Além da necessidade de novos materiais, outros problemas a serem superados pela radiografia industrial com nêutrons são a obtenção de radiografias de alta qualidade, o desenvolvimento de padrões radiográficos com nêutrons e a aceitação e validação desses padrões pela indústria. Nesse trabalho, Tomlinson descreve um pouco da história, dos problemas e das soluções relacionados com a utilização industrial da radiografia com nêutrons. São apresentadas as características de seis instalações para produção de radiografias com nêutrons e é sugerida uma estrutura organizacional, relacionando as especialidades necessárias em uma instalação orientada para tal atividade (TOMLINSON, 1977).

A radiografia com nêutrons é um valioso método de END para a Metalurgia, ao lado dos mais familiares e bem desenvolvidos métodos por raios-X e raios γ. Entretanto, o método com nêutrons não compete diretamente com os demais, pois dependendo das circunstâncias, com nêutrons obtêm-se informações complementares ou mesmo exclusivas com relação aos raios-X e raios γ, como já foi observado anteriormente. Rant e Ilic, da Universidade de Ljubljana, Iugoslávia, descreveram diferentes técnicas de microneutrongrafia e de radiografia com nêutrons, comparando-as criticamente com a microrradiografia por raios-X, enfatizando as características específicas do uso de nêutrons em exames radiográficos (RANT & ILIC, 1977). Foi comparada a microneutrongrafia com a auto-radiografia induzida por nêutrons usando detectores de traço de estado sólido (SSTD - *Solid State Track Detector*) e foram descritas as técnicas de gravação de traços (*track-etching*) e suas aplicações em Metalurgia. A microneutrongrafia e a auto-radiografia induzida com nêutrons permitem a investigação em escala microscópica de heterogeneidades químicas em metais, sendo que os exames microneutrongráficos são indicados quando há a presença de elementos altamente absorvedores de nêutrons nos metais sob exame. A auto-radiografia induzida com nêutrons está sendo cada vez mais utilizada em estudos metalúrgicos, devido a sua

excelente sensibilidade e resolução, apesar de estar restrita à investigação de nuclídeos que emitem partículas carregadas por absorção de nêutrons. Há uma grande expectativa quanto ao desenvolvimento de fontes portáteis de nêutrons para utilização em ensaios metalúrgicos não-destrutivos.

O ensaio radiográfico é uma técnica largamente utilizada em END, podendo ser empregado na inspeção de objetos metálicos e não-metálicos, sendo capaz de revelar imperfeições internas em diversos materiais. A qualidade da radiografia obtida é dependente não somente do equipamento de inspeção, mas também da técnica de processamento dos filmes radiográficos. Watson, do *Thames Valley State Technical College*, Reino Unido, discutiu os equipamentos, materiais e procedimentos utilizados na revelação de filmes radiográficos, bem como a influência de cada um dos parâmetros de revelação sobre a qualidade da imagem obtida (WATSON, 1977).

Jackson *et al.*, descreveram, em 1979, a instalação de um reator *TRIGA* de 250 *kW* no *Hanford Engineering Development Laboratory*, EUA, para possibilitar a realização de ensaios radiográficos com nêutrons de combustível nuclear e componentes do núcleo de reatores (JACKSON *et al.*, 1979). Nesse artigo, são descritos o reator *TRIGA*, o colimador e os componentes auxiliares instalados para inspeção de combustível nuclear não-irradiado. Para avaliar e garantir a qualidade das radiografias com nêutrons, foram empregados três tipos de indicadores de qualidade de imagens (IQI - *Image Quality Indicator*): o indicador de pureza do feixe (BPI - *Beam Purity Indicator*), o indicador de qualidade visual da imagem (VISQI - *Visual Image Quality Indicator*) e o indicador de qualidade da imagem do sistema (SYQI - *System Image Quality Indicator*). As medidas do fluxo de nêutrons térmicos no plano da imagem indicaram um fluxo de $5{,}8 \times 10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ com uma variação inferior a 6 % ao longo da área de exposição, a razão de cádmio foi de 3,75, o conteúdo de radiação γ foi de 2,7 *R/h* e razão nêutron/γ foi de $7{,}7 \times 10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$, sendo que todos esses valores foram obtidos com o reator operando à plena potência.

Tipicamente, os sistemas de Radiografia com Nêutrons em Tempo Real (RNTR) consistem de uma fonte de nêutrons constante, uma tela conversora por cintilação acoplada a um conversor de imagem e um sistema de TV, operando à taxa de 30 *quadros/s*. A radiografia com nêutrons em *stop-motion* utiliza reatores pulsados como fontes de nêutrons para congelar um evento dinâmico. Pulsos largos, de cerca de 10 *ms* de largura, de um típico reator que produz nêutrons térmicos, tal como o *TRIGA*, permitem a obtenção de radiografias de alta definição de eventos dinâmicos relativamente lentos. A utilização de pulsos de 50 μs de largura, típicos de reatores

rápidos pulsados, possibilita a radiografia de processos rápidos sem implicar num borramento excessivo da imagem. Bossi *et al.*, pesquisadores da *Oregon State University*, EUA, descreveram o desenvolvimento de uma técnica denominada "radiografia com nêutrons de movimentos de alta velocidade" ou "radiografia com nêutrons *flash cine*". Essa técnica permite a obtenção de seqüências rápidas de radiografias, tornando possível a análise radiográfica de processos dinâmicos entre 1 e 10 *ms* (BOSSI *et al.*, 1982), operando na faixa de 2.000 a 10.000 *quadros/s*. Para isso, foi utilizado um reator *TRIGA Mark II*, capaz de operar a 3.000 *MW* no modo pulsado, um colimador para o feixe neutrônico, uma tela cintiladora acoplada a um intensificador de imagens e uma câmara de 16 *mm* de alta velocidade. O fluxo máximo de nêutrons na posição do objeto a ser radiografado é de $4 \times 10^{11}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, com pulsos de 9 *ms* de largura. Para auxiliar a otimização do desempenho do sistema, foram empregadas técnicas de MTF. Nesse trabalho, há estudos detalhados sobre telas cintiladoras e sobre os efeitos das limitações estatísticas dessas telas na formação das imagens.

Com a finalidade de se obter imagens diretas e em tempo real de materiais nucleares, foi desenvolvido um sistema radiográfico com nêutrons para o *Kyoto University Reactor* (KUR), Japão. Esse sistema utilizou o terminal experimental E-2 do KUR que produz um fluxo de nêutrons térmicos adequado para radiografia. As imagens correspondentes às radiografias com nêutrons podem ser capturadas, processadas e armazenadas digitalmente ou mesmo gravadas usando um gravador de video-cassete (VCR - *Video Cassete Recorder*). O detector utilizado foi um cintilador de nêutrons NE-426, de LiF + ZnS(Ag), montado em um gabinete selado de alumínio e a imagem produzida é refletida, por um espelho revestido de alumínio, em direção a uma câmara de vídeo de alta sensibilidade a raios-X. Os sinais de vídeo foram digitalizados por um conversor analógico-digital (ADC - *Analog/Digital Converter*) de alta velocidade (cerca de 33 *quadros/s*), de forma que pôde ser obtida uma imagem em tempo real, nos formatos 480 x 512, 480 x 256 e 240 x 256 *pixels*, com 1, 2 ou 4 *bits* por *pixel*, que correspondem a 2, 4 ou 16 tons de cinza, respectivamente. O sistema computacional para processamento das imagens baseou-se em um microprocessador Z-80, operando a 4 *MHz*, com 32 *kBytes* de memória para imagens e 16 *kBytes* para área de trabalho. Esse sistema apresentou uma resolução espacial de 0,5 *mm* (FUJINE *et al.*, 1983).

Com o advento dos sistemas radiográficos com nêutrons para análise de processos transitórios em tempo real, surgiu a necessidade de se desenvolver um meio de avaliar e comparar quantitativamente esses sistemas, Lindsay *et al.* descreveram a aplicação da MTF ao dispositivo radiográfico em tempo real do *Missouri University*

Research Reactor, EUA. A MTF do sistema foi calculada determinando-se as suas componentes individuais da seguinte forma: (a) geometria do feixe, através de cálculo teórico; (b) câmara de vídeo e digitalizador, através da resposta à onda quadrada; (c) tela conversora, através da resposta à borda aguda e à fenda estreita (LINDSAY *et al.*, 1983). Com esse trabalho, concluiu-se que dos vários absorvedores estudados, o gadolínio, um β-emissor, produz a melhor resolução nas frequências mais elevadas, com uma perda correspondente na velocidade. Os α-emissores, boro e lítio, por sua vez, resultam em uma resolução inferior, mas são mais velozes e produzem mais fótons em sua saída, permitindo a obtenção de radiografias mesmo com baixos fluxos de nêutrons.

A maioria das técnicas de radiografias com nêutrons emprega um conversor de nêutrons e um filme fotográfico para registro das imagens. Entretanto, essas técnicas com filmes são inadequadas em ensaios industriais não-destrutivos realizados em grande escala. Verat *et al.*, da Divisão de Tubos Eletrônicos da *Thomson-CSF*, França, descreveram a utilização de tubos intensificadores de nêutrons no *imageamento* desses ensaios, salientando as vantagens e as potencialidades do *imageamento* em tempo real, em confronto com o registro em filmes (VERAT *et al.*, 1983).

O usuário de END através de radiografias com nêutrons deve dispor de meios de avaliar os resultados obtidos, em termos de qualidade e reprodutibilidade. Bayon e Laporte, do *Centre d'Études Nucléaires de Saclay*, França, discutiram diversos processos de padronização de ensaios radiográficos com nêutrons, descrevendo um método para caracterização de uma instalação radiográfica com nêutrons (BAYON & LAPORTE, 1983). Além disso, foram descritos IQIs utilizados em testes para identificar vazios, fraturas e deficiências em materiais.

Gade-Nielsen e Olsen, do *Risφ National Laboratory*, Dinamarca, concluíram que, para melhorar a precisão das medidas dimensionais de varetas combustíveis de reatores nucleares, é de extrema importância medir a relação Sinal/Ruído (S/R) das radiografias com nêutrons utilizadas no ensaio dessas varetas (GADE-NIELSEN & OLSEN, 1983). Os autores utilizaram um sistema de PDI para medir o sinal e o ruído presentes nas radiografias. Nesse trabalho, é apresentado um modelo de função de transferência para o processo radiográfico com nêutrons, adotado da radiografia por raios-X. Além disso, são apresentadas medidas preliminares da razão S/R de vários conjuntos filme-conversor.

Fuga, em 1984, descreveu a instalação para produção de radiografias com nêutrons do reator IEA-R1, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN),

em São Paulo (FUGA, 1984). O reator IEA-R1 é um reator *TRIGA*, do tipo piscina, de 2 *MW* de potência, equipado com um colimador horizontal para extração dos nêutrons. Nesse trabalho, são descritos o colimador, a redoma ou câmara de irradiação dos objetos, os cassetes de irradiação direta ou por transferência e os dispositivos auxiliares. Há, ainda, uma descrição da montagem do dispositivo extrator de nêutrons e do procedimento para realização de ensaios não-destrutivos através da radiografia com nêutrons. O fluxo de nêutrons térmicos na entrada do colimador, junto ao núcleo do reator, é da ordem de $10^{11}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, enquanto que no plano do objeto sob análise esse fluxo é de $10^{7}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, com uma razão de cádmio igual a 19. A razão de colimação, L/D, do dispositivo é de 250, a resolução geométrica está entre 0,04 *mm* e 0,4 *mm*, dependendo da distância entre o objeto e o conversor, enquanto que a resolução total do sistema, limitada pela resolução inerente (relacionada com o filme e com conversor utilizados), é de 0,2 *mm* para um conversor de disprósio de 0,1 *mm* de espessura e um filme tipo A industrial.

A radiografia com nêutrons tornou-se uma das mais importantes técnicas de ensaio não-destrutivo, aplicadas a combustíveis e materiais nucleares irradiados, realizadas na Instalação de Exame de Combustíveis Quentes (HFEF - *Hot Fuel Examination Facility*), do ANL. Sua instalação para radiografia com nêutrons (NRAD - *Neutron Radiography*), utiliza um reator *TRIGA* de 250 *kW* como fonte de nêutrons e é integrada com uma célula quente, de forma que amostras altamente radioativas podem ser radiografadas sem serem removidas do ambiente da célula quente. A instalação NRAD é completamente dedicada à radiografia com nêutrons e os dois terminais extratores de nêutrons são otimizados para o exame de combustíveis nucleares altamente radioativos. McClellan e Richards descreveram brevemente algumas técnicas de obtenção de radiografias com nêutrons, tais como: uso de nêutrons térmicos e epitérmicos, radiografia com *Polaroid*, radiografia por *track-etch* e tomografia. A instalação NRAD vinha sendo de grande utilidade para vários pesquisadores devido a sua capacidade de realizar radiografias com nêutrons térmicos e epitérmicos em amostras inseridas ou não na célula quente, devido à versatilidade de seu projeto e devido à possibilidade de realizar tomografias (McCLELLAN & RICHARDS, 1984).

Berger, em 1986, publicou um artigo sobre os avanços em radiografias com nêutrons. Nesse artigo, Berger enumera as aplicações da radiografia com nêutrons na inspeção de explosivos, lâminas de turbinas, montagens mecânicas, na observação de fluidos e na detecção de corrosão. Uma fonte de nêutrons adequada para radiografia deve, segundo Berger, atender às seguintes especificações: (a) fluxo de nêutrons

térmicos junto ao detector: $10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ ou maior; (b) razão L/D do colimador: 20 ou maior; (c) conteúdo de nêutrons térmicos: 55 % ou mais; (d) razão nêutron/γ: $10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$ ou maior. Na época, dois métodos radiográficos vinham recebendo grande atenção em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): tomografia e *imageamento* eletrônico em tempo real (BERGER, 1986).

O sistema radiográfico com nêutrons em tempo real da *University of Virginia*, EUA, foi modificado para permitir a determinação da densidade de materiais, através da medição do grau de atenuação dos nêutrons. Para capturar as imagens radiográficas, foi utilizada uma tela de oxissulfeto de gadolínio, um intensificador eletrostático de imagem e uma câmara de vídeo monocromática. A análise quantitativa das imagens foi realizada por um processador digital de imagens, capaz de digitalizar imagens de 512 x 512 *pixels*, com 256 tons de cinza, à taxa de 30 *quadros/s*. Um *software* foi desenvolvido para realizar a normalização do fundo, com a finalidade de corrigir não-uniformidades do feixe de nêutrons e para transformar as unidades de luminância em unidades de densidade, usando-se a função de atenuação da lei de Lambert-Beer-Bouguer (McRAE *et al.*, 1986).

O estudo da dinâmica dos lubrificantes e componentes mecânicos encapsulados em recipientes metálicos é de interesse de várias indústrias, sendo particularmente importante o estudo do fluxo de óleos ou lubrificantes dentro do recipiente metálico durante a operação do dispositivo. Levine e Hughes, da *Penn State University*, EUA, descreveram o projeto e a aplicação bem-sucedida de um sistema de radiografia com nêutrons em tempo real no estudo da lubrificação de um motor a gasolina. Esse sistema é composto pelo *Penn State Breazeale Nuclear Reactor* (PSBR), por uma coluna térmica de deutério (D_2O-TC), um canal extrator de nêutrons, um colimador cônico divergente de nêutrons, um tubo de extensão blindado e um sistema de *imageamento* de nêutrons em tempo real. O PSBR é um reator *TRIGA Mark III*, do tipo piscina, refrigerado e refletido por água leve, da *General Atomics*, capaz de operar continuamente a 1 *MW* e no modo pulsado a 2.000 *MW*. O sistema de *imageamento* consistia de um conversor de nêutrons de dioxissulfeto de gadolínio, de um intensificador eletrônico de imagem e de uma câmara CCTV. Foi possível obter uma resolução espacial de 0,04 *cm*, com uma razão de cádmio de 50 e uma razão n/γ melhor que $1 \times 10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot mrad^{-1}$. Com esse sistema, foi observado o fluxo de óleo no interior do cilindro durante a operação do motor, além do posicionamento de *O-rings* e outros componentes hidrogenados não-observáveis através de raios-X (LEVINE & HUGHES, 1986).

O *Phoenix Memorial Laboratory* (PML), da *University of Michigan*, EUA, implantou uma instalação para realizar END através da radiografia com nêutrons em tempo real. Essa instalação utiliza um reator nuclear *Ford*, do tipo piscina, de 2 *MW*, para produzir os nêutrons que, após serem colimados, atravessam o objeto sob teste, produzindo uma radiografia que é capturada por um sistema de *imageamento*. Lindsay *et al.* descreveram os testes comparativos entre um dispositivo de *imageamento* de nêutrons *Lixi** e o sistema de *imageamento EMI*, em operação na instalação, quanto à sensibilidade, contraste e resolução (LINDSAY *et al.*, 1986a). O sistema de *imageamento EMI* consistia de uma tela de oxissulfeto de gadolínio, montada em uma caixa vedada à luz, um espelho frontal, lentes e um tubo intensificador de imagens magneticamente focalizado. O dispositivo de *imageamento Lixi* utilizava uma tela de oxissulfeto de gadolínio de alta resolução, acoplada através de fibras ópticas a um tubo intensificador de imagens, de forma a produzir uma imagem que poderia ser capturada por uma câmara de vídeo ou por uma câmara de 35 *mm*. Em ambos os casos, a imagem foi capturada por um sistema de processamento de imagens *Quantex QX-9200*. Para avaliar a qualidade das imagens dos sistemas, foram utilizados diversos tipos de Indicadores de Resolução Visual (IRV). A partir dos testes realizados, concluiu-se que o dispositivo *Lixi* apresentou melhor sensibilidade e resolução que o sistema *EMI*, mas é limitado em função de seu diâmetro de entrada, de cerca de 5 *cm*.

A Radiografia com Nêutrons em Tempo Real (RNTR) é uma importante ferramenta de pesquisa no estudo do fluxo de fluidos hidrogenados e a utilização de técnicas de processamento de imagens permite a melhoria e a análise das imagens obtidas com essa ferramenta. O PML, da *University of Michigan*, EUA, desenvolveu um dispositivo dedicado à RNTR, para estudar sistemas de lubrificação e de pulverização. Esse dispositivo possibilitou a verificação do perfil de pulverização de diferentes tipos de jatos e as alterações desse perfil em função da pressão do fluido. Além disso, foi realizada a tomografia tridimensional de pulverizadores. Através do uso de técnicas de processamento de imagens, foi possível obter imagens em que apenas o movimento do fluido sob investigação é mostrado. Algumas aplicações do RNTR são: estudo do fluxo de óleo num sistema de transmissão dianteira de um automóvel; estudo de cavitação e entupimento em injetores de combustível usados em turbinas a jato; estudo do transporte de água através do solo etc. (LINDSAY *et al.*, 1986b).

Um processo de reconstrução de imagens com nêutrons é realizado através da aquisição de diversas radiografias com nêutrons de um objeto que é girado em torno

* *Lixi* e *EMI* são nomes de sistemas de *imageamento*.

de seu eixo central, dando origem a várias projeções. Esse sistema tomográfico, baseado em radiografias com nêutrons, tem a qualidade das reconstruções influenciada pela divergência do feixe neutrônico, pelo espalhamento dos nêutrons ao atravessar o objeto, pelas características inerentes ao sistema filme-conversor, pelo espectro de energia dos nêutrons incidentes e pela presença de radiação γ. Crispim *et al.*, do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN), da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), no Rio de Janeiro, desenvolveram um método para minimizar os efeitos desses fatores sobre a qualidade da imagem reconstruída, a partir da aplicação do filtro de Wiener nas projeções obtidas por meio de radiografias com nêutrons (CRISPIM *et al.*, 1986a). Foi realizada uma análise comparativa entre as imagens obtidas após a aplicação do algoritmo de reconstrução iterativa *Algebric Reconstruction Technique* (ART), usando projeções sem ruído, com ruído e filtradas.

McClellan e Tow, publicaram, em 1986, um artigo sobre a utilização da tomografia com nêutrons no estudo de elementos combustíveis danificados de reatores nucleares (McCLELLAN & TOW, 1986). Esse trabalho foi realizado na HFEF do ANL, que foi projetada e equipada para a realização de radiografias com nêutrons térmicos e epitérmicos de alta qualidade. Essa instalação possui um reator *TRIGA* de 250 *kW* como fonte de nêutrons. As radiografias foram digitalizadas por um microdensitômetro de varredura controlado por computador, sendo que os dados digitalizados foram transmitidos para um computador responsável pela reconstrução das seções transversais dos elementos combustíveis sob exame.

O dispositivo extrator de nêutrons do reator IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), foi instalado em 1986 (AMORIM, 1986a). O reator IPR-R1 é um reator *TRIGA*, do tipo piscina, refrigerado e moderado a água, de 100 *kW* de potência, que produz um fluxo de nêutrons térmicos de $2 \times 10^8\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ na entrada do canal extrator, sobre o anel refletor de grafita que circunda o seu núcleo. Para obtenção das radiografias com nêutrons, foi empregado o método direto, utilizando-se uma lâmina conversora de gadolínio de 0,1 *mm* de espessura e filmes *Kodak*, do tipo *AA-5*, e submetendo-se os objetos a um fluxo de nêutrons térmicos de $1{,}7 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, durante um tempo de exposição nunca superior a 5 minutos, a uma distância de 3,62 *m* do núcleo do reator (AMORIM, 1986b).

O desenvolvimento de técnicas de aplicação de radiações nucleares, para obtenção de imagens médicas e imagens de END de materiais, tem sido um dos trabalhos realizados pelo LIN, da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia/Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), há vários anos.

Dentre os projetos desenvolvidos pelo LIN, destacam-se: sistema de tomografia computadorizada por transmissão, usando feixes paralelos e feixes em leque; sistema de tomografia computadorizada por espalhamento Compton; e automação do microdensitômetro *Carl Zeiss Jena*, modelo *MD 100*, utilizado para leitura de filmes provenientes de radiografias com raios γ e com nêutrons. As radiografias com nêutrons foram obtidas usando-se o canal J-9 do reator Argonauta, do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), como fonte de nêutrons, com o reator operando a 170 *W* e expondo os filmes durante 40 minutos ao fluxo de nêutrons (LOPES *et al.*, 1987).

Domanus, do *Risφ National Laboratory*, Dinamarca, publicou um artigo, em 1987, onde são discutidos os seguintes tópicos relativos à radiografia com nêutrons: instalações em piscina e instalações secas; uso de lâminas conversoras com halóides de prata nos métodos direto e por transferência; vantagens da utilização do filme de nitrocelulose para radiografar objetos radioativos; *imageamento* em tempo real; definição de padrões para radiografia com nêutrons; utilização de reatores de pesquisa como fontes de nêutrons para aplicações científicas, industriais e não-industriais e; exemplos de radiografias com nêutrons nas indústrias nuclear e não-nuclear (DOMANUS, 1987).

Os pesquisadores do *Kyoto University Research Reactor Institute* (KURRI) descreveram, em 1987, as técnicas utilizadas para melhorar o desempenho do sistema de *imageamento* de RNTR daquele Instituto (FUJINE *et al.*, 1987). Dentre essas técnicas, destacam-se o desenvolvimento de novos padrões indicadores de qualidade, a utilização de uma câmara de tubo *Silicon Intensifier Target* (SIT) e de um sistema de vídeo de alta velocidade, a aquisição de um sistema de memória com discos ópticos para armazenamento de imagens e o aperfeiçoamento dos sistemas de *software* e *hardware* para acelerar o processamento das imagens e aumentar a resolução obtida.

O estudo da dinâmica de fluidos dentro de encapsulamentos metálicos é de vital importância para muitas indústrias e é uma ferramenta útil no desenvolvimento de seus produtos. Os pesquisadores do PSBR, EUA, desenvolveram um programa de pesquisa onde a radiografia com nêutrons em tempo real é utilizada na visualização do comportamento do fluxo de líquidos em sistemas móveis e estáticos. A técnica utilizada consiste no *imageamento* radiográfico de materiais traçadores opacos a nêutrons (partículas sólidas ou fluidas) em um ambiente fluido transparente a nêutrons. Nesses experimentos, foram registradas imagens de vários tipos de fluxos simples, obtendo-se informações como velocidades de fluxos, regiões de separação de fluxos, taxa de mistura etc. Essa técnica de ensaio permite a visualização *off-the-shelf* em tempo real de fluxos

em dispositivos metálicos como válvulas, motores, componentes de transmissão etc. (CIMBALA *et al.*, 1988).

Uma instalação radiográfica com nêutrons em tempo real pode ser caracterizada através da medição dos seguintes parâmetros: fluxo total de nêutrons, razão de cádmio, razão nêutron/γ e razão efetiva L/D do colimador. Além dessas medições, os pesquisadores da *University of Virginia*, EUA, implantaram um método para medir a eficiência do colimador e o desempenho do sistema de *imageamento* através da medição da MTF do sistema. A MTF foi utilizada para determinar o não-paralelismo do feixe de nêutrons e os efeitos de alterações nos parâmetros de operação do reator, nas características do dispositivo extrator de nêutrons e em outros componentes do sistema sobre a qualidade da imagem. Todas as medições e cálculos do desempenho do sistema foram realizados utilizando-se uma câmara de nêutrons em tempo real e um *software* de processamento de imagens (SULCOSKI *et al.*, 1988). A técnica de medição, descrita por Sulcoski *et al.*, possibilitou um meio rápido, confiável e reprodutível de se monitorar quaisquer alterações em um sistema de *imageamento* com nêutrons em tempo real, seja no feixe de nêutrons, seja nos componentes eletrônicos do equipamento de captura e visualização de imagens.

Os pesquisadores do *Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH*, na Alemanha, realizaram um estudo comparativo entre a radiografia por raios-X e a radiografia com nêutrons (MAST *et al.*, 1989). A partir desse estudo, concluiu-se que a radiografia por raios-X oferece maior flexibilidade devido à facilidade de se produzir raios-X em uma ampla faixa de energias, o que não ocorre com os nêutrons. Entretanto, verificou-se, na prática, que a radiografia com nêutrons supera a radiografia por raios-X em situações onde o tempo de exposição necessário para a realização da inspeção por raios-X de um determinado objeto é inaceitavelmente longo.

Em 1989, foi realizada em Osaka, no Japão, a *Third World Conference on Neutron Radiography* (3ª Conferência Mundial sobre Radiografia com Nêutrons), com a participação de cerca de 200 especialistas de mais de 20 países (THIRD WORLD..., 1990). Nessa conferência, foram apresentados 107 trabalhos distribuídos nas seguintes áreas: revisões, instalações com reatores, fontes de nêutrons de pequeno porte, detectores, métodos com filme, método *track-etch*, métodos com televisão, processamento de imagens, aplicações em tempo real, aplicações nucleares, aplicações industriais, aplicações biomédicas, aplicações aeroespaciais, aplicações genéricas, tomografia e, medições dimensionais e padronização.

O laboratório de radioscopia com nêutrons (NR) da *University of Virgínia*, EUA, foi implementado em 1983, para investigação do fluxo de água em meios porosos e para estudar as características de cigarros. Nesse laboratório, são realizadas tanto a NR como a radiografia com nêutrons térmicos, sendo que a ênfase das pesquisas encontra-se no *imageamento* em tempo real de eventos dinâmicos. Como fonte de nêutrons, é utilizado um reator do tipo piscina, de 2 *MW*, refrigerado a água, tendo grafite como refletor parcial. Seu fluxo máximo de nêutrons térmicos é de $4 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, com uma razão nêutrons/γ de $5 \times 10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$ e uma razão de cádmio igual a 7. O sistema de *imageamento* emprega uma câmara de nêutrons *Precise Optics*, baseada num tubo de imagens *Thomson-CSF* e utiliza uma tela cintiladora de oxissulfeto de gadolínio, um intensificador eletrostático de imagens e uma câmara de vídeo. Comparada com a radiografia com filme, a NR apresenta menor contraste e resolução espacial. Todavia, a NR tem sido utilizada com sucesso em ensaios qualitativos, medição de densidade relativa, medição quantitativa de densidade e em *imageamento* tridimensional (BRENIZER *et al.*, 1990).

Os pesquisadores do KURRI publicaram, em 1990, uma compilação, contendo 62 artigos sobre as pesquisas em radiografias com nêutrons realizadas no Japão. A maioria desses trabalhos foi extraída dos anais da segunda e da terceira Conferência Mundial sobre Radiografia com Nêutrons, ocorridas em 1986 e em 1989, na França e no Japão, respectivamente (FUJINE *et al.*, 1990). Os trabalhos foram divididos em 14 categorias: revisão, reatores e instalações nucleares, fontes de nêutrons de pequeno porte, detectores de nêutrons, métodos com filme fotográfico, método *track-etch*, *imageamento* com televisão*, processamento de imagens, aplicações em tempo real, aplicações industriais, aplicações em biologia e ciências médicas, aplicações gerais, tomografia, e padrões e medidas dimensionais.

Durante o ano de 1990, pesquisadores das Universidades de Nagoya, Tottori e de Kyoto, no Japão, dedicaram-se a três linhas de pesquisa sobre radiografia com nêutrons: (a) experimentos para otimização da supressão do efeito do espalhamento dos nêutrons sobre as imagens obtidas; (b) experimentos em tomografia computadorizada, utilizando unicamente nêutrons transmitidos através do objeto sob análise; e (c) desenvolvimento de um sistema de *imageamento* e análise de radiografias em tempo real para inspeção de objetos em movimento (TASAKA *et al.*, 1993). Nesse artigo, são descritos os experimentos básicos realizados durante essas pesquisas.

* *Imageamento* em tempo real utilizando câmara de vídeo para captura das imagens.

Pesquisadores das Universidades de Nagoya e de Kyoto investigaram técnicas de análises quantitativas de elementos, através de radiografia com nêutrons (TAMAKI *et al.*, 1993). Nessas experiências, foi utilizado um colimador alveolar, construído com um material absorvedor de nêutrons, que apresentou excelentes resultados na remoção de nêutrons espalhados presentes no feixe de nêutrons. Além disso, foram investigadas as características de transferência de calor e o comportamento dinâmico de um fluxo em seções evaporadoras e condensadoras, através de um sistema de *imageamento* em tempo real.

Tsujii *et al.*, das Universidades de Osaka e de Kyoto, realizaram estudos experimentais com o objetivo de padronizar os indicadores de qualidade de imagens radiográficas com nêutrons (TSUJII *et al.*, 1993). A partir desses experimentos, foram desenvolvidos dois tipos de indicadores utilizando fios de náilon dispostos sobre placas cerâmicas ou metálicas.

Pesquisadores da Universidade de Kyoto desenvolveram um sistema de visualização e análise de fenômenos de transporte de fluidos, utilizando radiografia com nêutrons e técnicas de processamento de imagens (NISHIHARA *et al.*, 1993). Esse sistema de *imageamento* em tempo real permitiu o estudo da dinâmica de fluidos no interior de tubos metálicos sem introduzir qualquer perturbação no fluxo sob investigação.

A radiografia com nêutrons foi utilizada, por pesquisadores da Universidade de Kyoto (OGINO *et al.*, 1993), para visualizar o movimento de partículas, as trajetórias e os perfis de velocidade de partículas sólidas em fluxos bifásicos líquido-sólido.

2.2 Processamento de imagens

O Processamento Digital de Imagens (PDI) teve uma de suas primeiras aplicações no início da década de 20, quando fotografias de jornais foram digitalizadas e transmitidas através de um cabo submarino que interligava Londres e Nova Iorque. Entretanto, foi na década de 60, com a proliferação dos computadores digitais de grande porte e com a demanda criada em função da corrida espacial é que o potencial do PDI passou a ser intensamente explorado. As primeiras aplicações de técnicas computacionais na melhoria de imagens espaciais foram realizadas no *Jet Propulsion Laboratory*, EUA, em 1964, quando imagens da Lua, transmitidas pela sonda *Ranger 7*, foram processadas digitalmente, com a finalidade de corrigir distorções inerentes ao processo televisivo. De

1964 em diante, o emprego do PDI difundiu-se pelas mais diversas áreas do conhecimento humano, que possuíam em comum apenas a necessidade de um método capaz de realçar as informações contidas em imagens, de forma a possibilitar a análise e a interpretação das mesmas por especialistas dessas áreas (GONZALEZ & WINTZ, 1987).

Harris, do *Scripps Institution of Oceanography*, na Califórnia, publicou, em 1966, um artigo sobre avaliação e restauração de imagens. Nos experimentos descritos nesse artigo, imagens degradadas foram registradas em filme fotográfico e, em seguida, digitalizadas por um *scanner**, opticamente semelhante a um microdensitômetro, especialmente construído para esse fim. As imagens digitalizadas foram registradas em cartões perfurados e processadas por um computador CDC 3600 da *University of California* (HARRIS, 1966). As imagens restauradas, por sua vez, foram registradas em cartões perfurados, na forma de matrizes de valores discretos. Os tipos de degradações restauradas foram: (a) borramento devido a movimento do objeto durante a exposição do filme fotográfico e (b) influência de turbulências atmosféricas em fotografias de longa exposição obtidas a partir de telescópios. As técnicas de processamento de imagens aplicadas às imagens foram: inversão, média, diferenciação e subtração de imagens.

O principal fator de limitação no processamento de imagens é a presença de ruído. Partindo desta afirmação, Billingsley, do *California Institute of Technology*, EUA, estudou os efeitos de ruídos sobre a visualização, quantificação e análise de imagens (BILLINGSLEY, 1975). Nesse artigo, investigou-se a maneira como o ruído afeta a aparência da imagem e de que forma ele perturba o processamento digital de imagens. Várias fontes de ruídos foram investigadas (granulação do filme, ruído eletrônico e ruído transiente), com a finalidade de se determinar sua influência sobre o brilho do sinal quantificado.

Harlow *et al.*, da *University of Missouri-Columbia*, EUA, desenvolveram um sistema para análise automática de imagens radiográficas, específico para radiografias médicas (HARLOW *et al.*, 1976). As principais dificuldades encontradas para a realização desse trabalho foram: (a) complexidade intrínseca da análise de imagens; (b) quantidade de informação presente em uma radiografia; (c) falta de entusiasmo por parte dos radiologistas quanto ao uso de imagens processadas em diagnósticos; (d) inexistência de recursos computacionais de alto desempenho e baixo custo, capazes de atender à realidade das clínicas radiológicas. Por outro lado, o uso de um sistema computadorizado para análise radiográfica oferece as seguintes vantagens: (a) permite o

* Equipamento digitalizador de imagens.

atendimento de um número maior de pacientes; (b) melhora a qualidade dos diagnósticos; (c) proporciona diagnósticos padronizados e repetitivos. Durante esse trabalho, concentrou-se no desenvolvimento, interligação e ensaio de diversos monitores e digitalizadores, uma vez que esses equipamentos apresentavam grande influência nos resultados obtidos. A implementação do sistema foi dividida em etapas: (a) criação de uma biblioteca de imagens, utilizadas na avaliação dos programas de análise; (b) definição do *hardware* para digitalização, visualização e processamento da informação radiográfica; (c) desenvolvimento de algoritmos e técnicas adequados para análise radiográfica; (d) aplicações e avaliação do desempenho do sistema. As principais aplicações desse sistema foram: localização de tumores em radiografias pulmonares, cálculo de volumes cardíacos e pulmonares a partir de radiografias pulmonares frontais e laterais, classificação de texturas pulmonares, análise de cineangiografias e detecção de arteriosclerose.

O PDI é uma ferramenta poderosa na expansão da sensibilidade e da aplicabilidade das técnicas radiográficas de inspeção, pois oferece um meio versátil para análise e medição de características e propriedades estruturais de materiais, possibilitando uma solução automatizada para problemas de inspeção de rotina. Schlosser, da *Spatial Data Systems*, EUA, discutiu o emprego de técnicas de análise e melhoria de imagens a ensaios não-destrutivos através de radiografias (SCHLOSSER, 1977). Nesse trabalho, é descrito um sistema de *imageamento*, utilizando um circuito fechado de TV, bem como as rotinas de PDI para solucionar diversos problemas de inspeção.

As técnicas de processamento de imagens têm sido largamente aplicadas a imagens radiográficas. Trussel, publicou uma revisão de três aspectos do processamento de imagens aplicado no *imageamento* radiográfico por raios-X: tomografia computadorizada, *imageamento* por abertura codificada (*coded aperture imaging*) e a aplicação de realce e restauração a imagens radiográficas (TRUSSEL, 1981). Nesse artigo, o autor aborda em detalhes as limitações e as potencialidades do emprego das técnicas de realce às imagens radiográficas por raios-X.

A tomografia reconstrutiva com nêutrons é uma técnica de *imageamento* tridimensional que foi empregada no *Idaho National Engineering Laboratory*, EUA, para inspeção de feixes de varetas irradiadas de combustível nuclear, sob severas condições de teste. Para a produção de tomografia com nêutrons, há três procedimentos fundamentais: (a) obtenção de diversas projeções do objeto sob análise, através de radiografias multi-ângulos; (b) digitalização das radiografias e (c) processamento digital dos dados para

gerar as imagens correspondentes às seções transversais do objeto. Richards *et al.* descreveram a capacidade da Instalação para Exame de Combustível Quente (HFEF - *Hot Fuel Examination Facility*), do ANL, e as técnicas de processamento de dados utilizadas para reconstruir as imagens correspondentes ao interior de um feixe de 91 varetas combustíveis, a partir de radiografias multi-ângulos com nêutrons (RICHARDS *et al.*, 1982).

Os pesquisadores da *Kyoto University*, Japão, descreveram a aplicação de um sistema de *imageamento* com nêutrons em tempo real à tomografia computadorizada com nêutrons. Nesse caso, os dados referentes a cada projeção podem ser adquiridos de uma única vez e a imagem da projeção pode ser visualizada em um monitor de vídeo. As imagens reconstruídas foram obtidas a partir do emprego de duas funções de ponderação associadas com o algoritmo de convolução de Fourier. A qualidade das imagens reconstruídas foi suficiente para distinguir resinas acrílicas, aço inoxidável e cobre e para detectar a presença de água em um orifício de 1,5 *mm* de diâmetro (FUJINE *et al.*, 1984).

Pesquisadores do laboratório do reator nuclear da *University of Virgínia* e do *Philip Morris Research Center*, EUA, desenvolveram, conjuntamente, um sistema radiográfico com nêutrons em tempo real, tendo utilizado esse sistema para observar em tempo real a deposição de um aerossol absorvedor de nêutrons em um filtro (BRENIZER *et al.*, 1984). O sistema radiográfico consiste de um extrator de nêutrons, uma câmara de nêutrons e um processador digital de imagens para melhorar e analisar as imagens. O canal extrator provê um fluxo de nêutrons térmicos de $10^{11}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, com o reator operando a 2 *MW*. A câmara de nêutrons converte a imagem de nêutrons em uma imagem de vídeo utilizando uma tela de oxissulfeto de gadolínio de 50 μm de espessura, um intensificador de imagens e uma câmara de vídeo *Newvicon*. O sinal da câmara pode ser visto ao vivo ou gravado em um VCR e a imagem pode ser analisada ou melhorada pelo processador digital de imagens. As funções de *software* empregadas na melhoria e análise das imagens foram as seguintes: redução recursiva de ruído, integração e diferenciação, filtragem não-recursiva, melhoria de contraste e armazenamento digital. Para realizar o experimento, uma solução aquosa de tricloreto de gadolínio ($GdCl_3$) foi nebulizada, secada e neutralizada para produzir o aerossol. Esse aerossol foi filtrado por um filtro de cigarro de acetato de celulose, sendo que as deposições do aerossol foram analisadas como uma função do tempo e da distância.

Uma das tarefas fundamentais de todo sistema de *imageamento* radiográfico é a detecção precisa de irregularidades no objeto sob análise. A aplicação de PDI a

imagens radiográficas tem por objetivo permitir que os radiologistas possam extrair mais informação das radiografias. Ishida *et al.*, do *Kurt Rossmann Laboratories for Radiologic Image Research*, EUA, estudaram os efeitos da aplicação de PDI sobre a detectabilidade de padrões radiográficos simulados de baixo contraste. Durante as experiências, foram variados alguns parâmetros das imagens, como nível de ruído, tamanho do objeto, contraste do sinal e fator de realce de contraste, sendo que a única técnica de PDI aplicada foi a operação de realce de contraste, devido a sua simplicidade e seu amplo emprego em sistemas radiográficos digitais. Os resultados obtidos indicaram que as imagens processadas permitiram um aumento significativo na capacidade do analista de detectar irregularidades, quando comparada com a análise das imagens originais (ISHIDA *et al.*, 1984).

A maioria dos sistemas de *imageamento* de nêutrons em tempo real utiliza um intensificador de imagem entre o conversor e a câmara de vídeo para amplificar os fótons produzidos pelos nêutrons incidentes no conversor. Fujine *et al.* desenvolveram, no KURRI, um sistema de *imageamento* que não utiliza intensificadores de imagem e captura as imagens radiográficas diretamente da tela conversora, através de uma câmara *orthicon*, sensível a raios-X. Essas imagens, embora de baixa resolução e contraste, foram aplicadas na análise de combustíveis do reator KUR, do tipo MTR (*Materials Testing Reactor*), na investigação de objetos em movimento e em tomografia computadorizada com nêutrons. Através de integração de imagens, foi possível obter-se imagens de alto contraste e resolução, sendo que a resolução espacial do sistema foi de aproximadamente 0,5 *mm* para uma exposição integrada equivalente a $1{,}6 \times 10^7\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. O processamento de imagens permitiu a observação de detalhes invisíveis em imagens diretas, tais como: pequenos orifícios, através da reversão da imagem; defeitos em um detector, através da integração de imagens; objetos em movimento, através da extração de contornos; ligeiras diferenças entre duas imagens de baixo contraste, através da subtração de imagens etc. (FUJINE *et al.*, 1985).

A MTF é uma poderosa ferramenta na caracterização da resolução de sistemas de *imageamento*. Fujita *et al.*, da *University of Chicago*, EUA, desenvolveram um método para determinação da MTF analógica de pré-amostragem de sistemas de *imageamento* digital, além da freqüência de Nyquist. A MTF de pré-amostragem foi determinada pela média de duas transformadas de Fourier, obtidas a partir de dois alinhamentos extremos de uma fissura relativa às coordenadas de amostragem (FUJITA *et al.*, 1985).

A extração de informações quantitativas de ensaios radiográficos é baseada fundamentalmente nas medições de distâncias entre bordas e fronteiras de interesse na imagem analisada. Seja na radiografia com filme, seja na radiografia em tempo real, a imagem obtida sofre uma degradação devido à presença de ruído e à limitação da resolução. Para melhorar a qualidade dessas imagens, foram desenvolvidas várias técnicas que reforçam algumas características das imagens. Para tal, a técnica mais amplamente empregada é a que torna as imagens mais nítidas (*sharpening*), reforçando as altas freqüências espaciais através da aplicação de um operador derivativo. Ingman e Notea, do *Technion-Israel Institute of Technology*, Israel, publicaram um estudo analisando as técnicas de diferenciação, as condições para detecção de bordas e a incerteza associada com a localização de bordas. A eficiência dessas técnicas foi demonstrada aplicando-as na identificação de bordas em radiografias com nêutrons de pastilhas calibradas de combustível nuclear (INGMAN & NOTEA, 1986).

O sistema de radiografia com nêutrons em tempo real do KURRI, em 1986, vinha sendo utilizado na identificação de veneno queimável no combustível do reator, na análise de objetos em movimento e em tomografia computadorizada. Fujine *et al.* descrevem a aplicação de técnicas de PDI, como integração, filtragem, melhoria de contraste, transformação da escala de cinza, extração de contornos e pseudocoloração, às imagens obtidas por um sistema de TV de baixa resolução e contraste. Através do processamento das imagens, foi possível obter uma resolução espacial de cerca de 0,5 *mm*, para uma exposição integrada de $1{,}6 \times 10^7\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ (FUJINE *et al.*, 1986). Para obter imagens de melhor qualidade, os pesquisadores do KURRI concentraram-se no desenvolvimento de novos conversores de nêutrons, de câmaras de TV mais sensíveis e de melhor resolução, e de um sistema de PDI de alto desempenho.

A dimensão do grão fotográfico é um dos fatores que mais afeta a qualidade e a reprodutibilidade de um ensaio através de radiografia com nêutrons. Dentre os diversos fatores que contribuem para a formação de uma imagem difusa, podem ser destacados o espectro de energia dos nêutrons incidentes sobre o filme, o espalhamento dos nêutrons no conversor e no objeto, as distâncias entre os conjuntos filme-conversor e objeto-conversor e a divergência do feixe neutrônico. Pode-se afirmar que o ruído é dependente do feixe incidente, com uma variância proporcional à potência da densidade do filme (CRISPIM *et al.*, 1986b). Nesse artigo, os autores descrevem a aplicação do filtro de Wiener-Hopf (uma técnica de filtragem ótima unidimensional), que minimiza o valor esperado do erro médio, às imagens obtidas através da radiografia com nêutrons. A partir dos resultados experimentais, pôde-se concluir que o filtro de Wiener foi eficiente

na supressão do ruído residual de alta freqüência inerente ao sistema, uma vez que o ruído total de altas freqüências, característico de radiografias com nêutrons de alta resolução, sofre uma pré-filtragem, devido ao processo de digitalização das radiografias, equivalente à ação de um filtro passa-baixas, quando as janelas de leitura (correspondentes à resolução do digitalizador) é inferior às dimensões dos grãos do filme.

Yonebayashi *et al.*, do KURRI, descreveram a aplicação de técnicas de processamento de imagens no estudo de escoamentos bifásicos através de radiografias com nêutrons em tempo real (YONEBAYASHI *et al.*, 1987). Para captura das imagens, foi utilizado um sistema de vídeo de alta velocidade (200 *quadros/s*), com resolução de 480 x 512 *pixels* e 256 tons de cinza. A partir dessas imagens, foram calculadas a fração vazia média e a concentração na área da interface de um escoamento bifásico.

Os pesquisadores da *University of Virginia* e do *Philip Morris Research Center*, Brenizer *et al.*, desenvolveram um sistema de vídeo para obtenção de radiografias com nêutrons em tempo real, a partir de equipamentos disponíveis comercialmente. Esse sistema consistia de um intensificador de imagens sensível a nêutrons, acoplado a uma câmara de vídeo, de um temporizador de sinais de vídeo, de um gerador de efeitos especiais, de um corretor de base de tempo, de um gravador de vídeo de alta resolução e de um processador digital de imagens. Esse processador era capaz de realizar as seguintes operações sobre imagens dinâmicas: melhoria de contraste, filtragem de ruído e integração de quadros (BRENIZER *et al.*, 1987). Nesse artigo, é descrita a aplicação do sistema de vídeo para visualização do fluxo de água em uma coluna de solo.

A tomografia computadorizada é uma valiosa ferramenta para reconstrução de imagens, tendo sido inicialmente aplicada no diagnóstico médico, mas que tem sido aplicada com sucesso em outras áreas científicas e tecnológicas, tais como na engenharia nuclear e no ensaio de materiais (KRÜGER, 1988). Krüger, do GKSS - *Forschungszentrum Geesthacht*, Alemanha, descreveu a aplicação do código de reconstrução de imagens tomográficas ART a projeções obtidas através de radiografias com nêutrons. Matematicamente, a reconstrução é realizada por uma solução iterativa de um sistema de equações lineares, sendo que se o sistema fôr determinado, são obtidas imagens de melhor qualidade. O parâmetro que mais influencia a qualidade da imagem reconstruída é o número de projeções obtidas.

Shand, do *Harwell Laboratory*, em Oxfordshire, Reino Unido, descreveu um sistema de processamento de imagens aplicado ao estudo do escoamento de fluidos (SHAND, 1988). Nesse trabalho, há uma descrição sucinta das operações básicas de PDI e são apresentadas três aplicações do sistema usando *laser light sheet illumination*, *particle image velocimetry* e radiografia com nêutrons. O sistema utiliza um processador de imagens em tempo real *Spectronic*, capaz de digitalizar imagens à taxa de vídeo, com uma resolução de 640 x 512 *pixels* e 256 tons de cinza. Esse processador foi conectado a um microcomputador PC-AT utilizando acesso direto à memória para acelerar a transferência de dados. Dois algoritmos, implementados em linguagem *C*, foram desenvolvidos para a análise das radiografias com nêutrons: integração dos tons de cinza e interpolação do volume líquido.

Fundamentalmente, a radiografia com nêutrons pode ser realizada através de dois métodos: a utilização de filmes fotográficos ou a utilização de sensores eletrônicos de imagem. Murata, do *Musashi Institute of Technology*, descreveu o uso de técnicas de *imageamento* eletrônico de radiografias com nêutrons no Japão, em 1989. Nesse trabalho, são discutidas as características desejáveis dos sensores de imagens, dos sistemas de processamento de imagens e dos dispositivos de visualização de imagens para os quatro tipos de imagens de radiografias com nêutrons existentes: estática, estereoscópica, tomográfica e dinâmica (MURATA, 1989).

Hagman e Richards, da *General Atomics*, EUA, descreveram um sistema estacionário de radiografia com nêutrons (SNRS - *stationary neutron radiography system*), utilizando um reator *TRIGA* (especialmente projetado para esse fim), posicionadores de objetos e um sistema de imageamento em tempo real (HAGMAN & RICHARDS, 1989). O SNRS foi projetado para realizar inspeção não-destrutiva para detecção de corrosão em componentes de aeronaves, consistindo do sistema de contenção e blindagem, do reator *TRIGA* e do sistema de inspeção de componentes. O reator é refrigerado a água por convecção natural, possuindo o refletor modificado para permitir a instalação de quatro terminais extratores de nêutrons. O projeto do refletor de grafite e do canal extrator de nêutrons foi otimizado para garantir um fluxo máximo de nêutrons térmicos e uma não-uniformidade mínima no plano da imagem. Os ensaios foram realizados com uma razão L/D igual a 100 e um fluxo de nêutrons térmicos de $6{,}4 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, com o reator operando a 250 *kW*. O sistema de inspeção de componentes era composto por um sistema de posicionamento de componentes (CPS), um sistema de *imageamento* de nêutrons (NIS) e um sistema de interpretação de imagens (IIS). O CPS manipulava componentes de aeronaves nas quatro câmaras de

inspeção, o NIS transformava as variações na intensidade do fluxo de nêutrons em imagens de vídeo e o IIS coletava, processava e apresentava as imagens recebidas do NIS.

A aplicação de radiografia com nêutrons e de técnicas de processamento de imagens no estudo de fluxos bifásicos gás-líquido em um duto retangular estreito é descrita pelos pesquisadores do KURRI e do *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) (MISHIMA *et al.*, 1989). Um experimento foi realizado utilizando-se o canal extrator de nêutrons E-2 do KUR, que é um reator de pesquisa do tipo piscina, operando a 5.000 *kW* e outro experimento, com um feixe pulsado de nêutrons, foi realizado no *Nuclear Safety Research Reactor* (NSRR) do JAERI, um reator *TRIGA*, que pode ser operado no modo contínuo ou pulsado e produz um fluxo de nêutrons térmicos de $8 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, operando no modo contínuo a 200 *kW*. Dois sistemas de *imageamento* foram testados no KUR: (a) a combinação de um conversor fluorescente de dioxissulfeto de gadolínio e térbio ($Gd_2O_2S(Tb)$) e uma câmara *orthicon* e (b) o conversor fluorescente e um tubo SIT. No NSRR, foi adotado um conversor fluorescente e um tubo SIT, em tempo real, e uma folha de gadolínio de 12,5 μm de espessura e um filme *Kodak SR*, no método direto. A unidade de processamento de imagens realizava as seguintes funções: integração, inversão, subtração, filtragem e extração de contornos. Pôde-se concluir que as técnicas de processamento de imagens são úteis no cálculo da fração vazia média em escoamentos bifásicos, mas que uma melhor precisão pode ser conseguida utilizando-se imagens integradas. Por outro lado, a qualidade das imagens obtidas não foi suficiente para calcular a área de interface entre duas fases, sendo necessária a utilização de feixes pulsados ou mais intensos de nêutrons e o desenvolvimento de conversores fluorescentes de maior sensibilidade.

Reuscher *et al.* descreveram, em 1990, a instalação de um sistema de *imageamento* de radiografias com nêutrons em tempo real no *Texas A&M University Nuclear Science Center*, EUA, (REUSCHER *et al.*, 1990). Esse sistema, originalmente construído para radiografia com nêutrons usando filmes, emprega uma tela cintiladora de ZnS(Ag) e uma câmara de vídeo para baixos iluminamentos, instaladas diante de um espelho posicionado a 45° com relação ao feixe de nêutrons. Nesse sistema, os componentes-chave eram a câmara de nêutrons e a unidade de captura e processamento das imagens. A câmara de nêutrons era composta da tela cintiladora, do espelho frontal, de lentes de ampliação e foco com controle remoto, de um intensificador de luz e da câmara de vídeo CCD monocromática. A unidade de captura e processamento das imagens consistia de um computador compatível com IBM-PC AT, um digitalizador de

imagens, um processador auxiliar de quadros e um monitor colorido de alta resolução. As funções de processamento de imagens executadas pelo sistema eram: convoluções espaciais N x M, *windowing*, histogramas, média de quadros, operações lógicas e aritméticas sobre imagens, *overlays* gráficas, melhoria de contraste, modificação da *look-up table*, subtração de fundo e outras. O desempenho do sistema foi medido através do exame de objetos estáticos, tais como indicadores de sensibilidade definidos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e padrões de cádmio para determinação da resolução a orifícios e fendas agudas.

Além do material bibliográfico acima apresentado, que focaliza a aplicação de rotinas de PDI a imagens radiográficas, deve ser mencionada a bibliografia específica de PDI, onde se encontram descritos desde os conceitos básicos até as aplicações mais sofisticadas de PDI, incluindo análise de imagens e visão computacional, p. ex. ROSENFELD (1969) trata de suavização, aguçamento e segmentação de imagens, além de descrever as técnicas de extração de atributos métricos de imagens. PRATT (1978) discute os métodos de avaliação da qualidade de imagens e aborda o realce, a restauração e a extração de atributos de imagens, com destaque para os dois últimos assuntos. ROSENFELD & KAK (1982a, b) tratam da digitalização, do realce, da segmentação e da extração de atributos de imagens. Em NIBLACK (1986), encontra-se uma descrição detalhada das principais técnicas de filtragem e segmentação de imagens. GONZALEZ & WINTZ (1987) devem ser compulsoriamente consultados e referenciados em qualquer trabalho sobre PDI, pois é um clássico onde se destacam as descrições de realce, pseudocoloração e segmentação de imagens. Em JAIN (1989), há uma excelente abordagem sobre técnicas de filtragem e restauração de imagens, além da descrição do realce e da extração de atributos de imagens, visando os sistemas de análise e de visão computacional. GALBIATI JR. (1990) descreve a aquisição e a análise de imagens, objetivando a implantação de sistemas de visão computacional, abordando também as técnicas de realce e segmentação de imagens. Por fim, LINDLEY (1991) apresenta diversas funções de PDI codificadas em linguagem C, com destaque para aquelas que tratam de realce, pseudocoloração e da aplicação de operações geométricas a imagens.

2.3 Conclusões

Neste capítulo, procurou-se apresentar, de forma integrada, a evolução cronológica da técnica radiográfica com nêutrons e da aplicação de PDI a imagens obtidas através de radiografia com nêutrons, tendo sido analisada a literatura básica sobre esses assuntos, no período compreendido entre 1948 e 1993, quanto à radiografia com nêutrons, e entre 1966 e 1992, quanto às aplicações de PDI a radiografias com nêutrons.

Foram consultados 126 trabalhos, entre livros, anais de congressos, artigos de periódicos, teses e dissertações, relatórios etc., sendo 48 sobre processamento de imagens e 65 sobre radiografia com nêutrons. Não se pretendeu, naturalmente, esgotar os trabalhos publicados sobre os assuntos, tendo sido empreendido um grande esforço na localização de um número significativo de referências, principalmente daquelas consideradas fundamentais no desenvolvimento de qualquer trabalho científico sobre o assunto.

Um estudo mais aprofundado sobre a radiografia com nêutrons pode ser realizado a partir de uma consulta ao material bibliográfico relacionado no item **Bibliografia Recomendada**. Ali, são listadas 113 referências que foram consultadas, mas não foram efetivamente utilizadas na elaboração desse trabalho. Essas referências complementam as informações contidas nos trabalhos apresentados nesse capítulo.

3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Nenhuma quantidade de processamento de imagens pode aumentar o conteúdo de informação presente em uma dada imagem.

James Harris

O processamento de imagens é uma ciência que trata da manipulação de imagens e de dados relacionados a imagens, incluindo um amplo espectro de técnicas e métodos aplicáveis às mais diversas áreas do conhecimento humano. O processamento de imagens pode ser considerado como sendo um caso especial de processamento de sinais bidimensionais.

O termo Processamento Digital de Imagens (PDI) refere-se, geralmente, ao processamento de uma imagem bidimensional por um computador. Uma imagem digital é uma matriz de números inteiros ou reais representados por um número finito de bits. Uma imagem na forma de transparência, diapositivo, fotografia ou mapa é digitalizada e armazenada como uma matriz de dígitos binários na memória do computador. A imagem digitalizada pode ser então processada e visualizada em um monitor de vídeo de alta resolução. O PDI possui um largo espectro de aplicações, como sensoriamento remoto, transmissão e armazenamento de imagens, restauração de pinturas, *imageamento* médico, cartografia, radar, sonar, processamento de sinais acústicos, robótica, inspeção industrial e em pesquisas científicas, incluindo astronomia, análise mineral, mecânica dos fluidos, análise radioativa, fisica de partículas e oceanografia, entre outras áreas (JAIN, 1989).

Imagens adquiridas por satélites são úteis na prospecção de recursos minerais, mapeamento geográfico, previsão de safras agrícolas, crescimento urbano, previsão meteorológica, enchentes e incêndios. As aplicações espaciais referem-se ao reconhecimento e à análise de objetos presentes em imagens obtidas por sondas espaciais. A transmissão e o armazenamento ocorrem em transmissões de televisão, teleconferências e facsímile, redes de computadores, circuitos fechados de TV e comunicações militares. Aplicações médicas incluem radiografias pulmonares, cineangiografias,

tomografias computadorizadas, ressonância magnética nuclear e ultrassonografia. Essas imagens podem ser utilizadas para detectar tumores ou outras doenças (JAIN, 1989). As classes de problemas relacionados com o PDI são:

- representação e modelamento de imagens;
- realce de imagens;
- restauração de imagens;
- análise de imagens;
- reconstrução de imagens;
- compressão de imagens.

O objetivo do PDI é realçar ou melhorar a imagem de alguma forma ou mesmo extrair informações da imagem (NIBLACK, 1986). Algumas operações típicas de PDI são:

- remover borramento de imagens;
- suavizar granularidades, pontilhamentos e ruídos presentes em imagens;
- realçar o contraste ou outras propriedades visuais de imagens;
- segmentar imagens em regiões, como objetos e fundo;
- ampliar, reduzir ou rotar imagens;
- remover deformações ou distorções de imagens;
- codificar imagens para posterior armazenamento ou transmissão.

Ainda hoje, são válidas as afirmações de HARRIS (1966), sobre as potencialidades e as limitações do PDI, abaixo reproduzidas:

- Devido a limitações de resolução e devido à presença de ruído, toda imagem contém uma quantidade finita de informação;
- A degradação da imagem sempre reduz o conteúdo da informação nela presente;
- Na presença de degradação, o sistema visual humano é incapaz de extrair eficientemente a informação contida na imagem;
- Uma imagem é processada com a finalidade de apresentar a informação nela contida de uma forma tal que possa ser extraída visualmente;

- Tanto o objetivo, quanto o limite fundamental do processamento de imagens são alcançados quando o sistema visual humano é capaz de extrair da imagem processada a informação contida na imagem degradada.

Outros tipos de processamento de imagens são: (a) óptico e fotográfico e (b) elétrico. Com relação a esses tipos de processamento, o PDI possui duas vantagens principais: (a) maior precisão, pois em cada etapa do processo fotográfico há uma perda considerável na qualidade da imagem e os sinais elétricos, por sua vez, são degradados por limitações físicas dos componentes elétricos; (b) maior flexibilidade, pois ajustes de contraste e brilho, p. ex., podem ser feitos de forma irregular, descontínua, limitados a regiões da imagem ou mesmo variados ao longo da imagem (NIBLACK, 1986).

3.1 Conceitos básicos

O processamento de imagens refere-se à manipulação e à análise de imagens por computador. Suas principais sub-áreas são (ROSENFELD, 1982a):

(a) Digitalização e compressão: conversão de imagens para a forma digital;

(b) Realce, restauração e reconstrução: melhoria de imagens degradadas (baixo contraste, borramento, ruído); reconstrução de imagens a partir de projeções;

(c) Casamento, descrição e reconhecimento: comparação e registro de imagens; segmentação de imagens; medição de propriedades.

3.1.1 Imagem

Genericamente, uma imagem corresponde a um quadro, uma fotografia ou a uma outra forma de representação visual de um objeto ou de uma cena. Em PDI, uma imagem é definida como uma matriz bidimensional de números. Convencionou-se que quanto maior esse número, mais clara a área por ele representada, de forma que, numa imagem monocromática, o valor zero corresponde a preto e o valor máximo corresponde a branco, enquanto que os valores intermediários correspondem a tons de cinza (NIBLACK, 1986). Pode-se então afirmar que uma imagem digital é descrita por uma matriz de *pixels* que indicam a intensidade luminosa sobre o elemento de imagem situado na posição (x, y).

3.1.2 *Pixel*

Cada ponto que compõe uma imagem é denominado *pixel*, que é uma abreviatura de elemento de imagem (*picture element*). O tamanho da área física representada por cada *pixel* depende da resolução espacial do sistema de *imageamento*. A cada *pixel* está associado um valor e suas coordenadas espaciais. O valor mínimo que um *pixel* pode assumir é zero e o seu valor máximo depende do tamanho da variável escolhida para representá-lo. A forma mais comum de se representar os *pixels* tem sido na forma de *bytes* (8 *bits*), onde o valor máximo é 255. Outros formatos são possíveis, dependendo, naturalmente, da arquitetura do computador (NIBLACK, 1986). O *pixel* numa dada posição *(x, y)* possui um valor que representa o valor médio da iluminação incidente sobre a área da imagem representada pelo *pixel*. Não há qualquer informação no *pixel* indicando a forma da área que ele representa, bem como não há qualquer informação sobre a uniformidade da iluminação incidente sobre o *pixel*.

3.1.3 Janela

Uma subregião da imagem é chamada de janela, sendo designada pelos quatro vértices de um paralelogramo.

3.1.4 Histograma

Um histograma é uma representação gráfica da freqüência de contagem da ocorrência de cada intensidade (nível de cinza) em uma imagem. A amplitude do histograma para um dado nível de cinza corresponde à probabilidade daquele nível de cinza ocorrer em qualquer *pixel* da imagem. O histograma não traz qualquer informação sobre a localização do *pixel* na imagem. A partir da análise da forma do histograma é possível extrair informações sobre algumas características da imagem. Um histograma estreito, p. ex., representa uma imagem de baixo contraste, enquanto que um nível de cinza específico pode representar uma dada característica de um componente da imagem, tal como um orifício numa peça (GALBIATI JR., 1990). Freqüentemente, é desejável medir a distribuição dos valores dos *pixels* em uma imagem. Para isso, pode-se utilizar a média, $\bar{v}$, e o desvio padrão, σ:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{x=y=0}^{L} \sum v(x,y) \qquad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{x=y=0}^{L}\sum\left[v(x,y)-\bar{v}\right]^2} \qquad (2)$$

onde N é o número de *pixels* na imagem (NIBLACK, 1986).

3.2 Aquisição de imagens

O sinal elétrico que representa a imagem pode ser obtido de duas formas: (a) seqüencialmente, por meio de um único sensor em câmaras de tubo ou (b) paralelamente, por meio da leitura de vários detectores de uma matriz sensora em câmaras de estado sólido. Em ambos os casos, é obtido um sinal de tensão elétrica em função do tempo, mas a forma desses sinais difere completamente entre si. Esses sinais contêm informações sobre o fluxo médio de iluminação sobre cada *pixel* da imagem (GALBIATI JR., 1990).

Um digitalizador (*scanner*) converte uma imagem para uma representação numérica adequada a um computador. Dentre os dispositivos digitalizadores mais comumente utilizados, encontram-se os microdensitômetros, os exploradores de feixe móvel (*flying spot scanners*), os dissectores de imagem, as câmaras *Vidicon* e os arranjos fotossensíveis de estado sólido (GONZALEZ & WINTZ, 1987). Qualquer fotografia ou negativo fotográfico pode ser digitalizado por *scanners* ou por microdensitômetros

Um *frame-grabber* digitaliza as imagens capturadas por uma câmara de vídeo num intervalo finito de tempo (tipicamente, 1/30 *s*, o tempo correspondente a um quadro de vídeo), organiza essa informação e armazena as imagens digitais em uma memória de armazenamento temporário. As câmaras digitais, que vêm sendo largamente empregadas em substituição aos clássicos filmes fotográficos, produzem imagens digitais diretamente, sem necessidade de se utilizar os *frame-grabbers*. Em áreas como medicina, ensaios de materiais e astronomia, há instrumentos que produzem imagens digitais a partir de raios-X, raios γ e ultrassom (NIBLACK, 1986). Os principais tipos de sensores de imagens são os seguintes:

(a) Matriz de elementos fotossensíveis posicionada no plano da imagem, onde cada elemento mede o brilho da cena num determinado ponto;

(b) Elemento fotossensor posicionado no plano da imagem, utilizado onde se pode iluminar apenas um ponto da imagem de cada vez. Este é o princípio do digitalizador *flying spot*;

(c) Câmara de TV. O padrão de brilho da cena é convertido em um padrão de cargas elétricas sobre uma grade, sendo que esse padrão é percorrido por um feixe de elétrons que produz um sinal de vídeo correspondente ao brilho da imagem.

Em todos esses esquemas, o brilho da imagem é convertido em um padrão de sinais elétricos ou em um sinal variante com o tempo, correspondendo a uma varredura seqüencial ou paralela da imagem. Se ao invés de se utilizar um sensor, fôr posicionado um filme fotográfico (ou qualquer outro material sensível à luz) no plano da imagem, o padrão de brilho dá lugar a um padrão de variação das propriedades ópticas do filme (ROSENFELD & KAK, 1982a). Para processos fotográficos comuns, a densidade óptica é aproximadamente uma função linear do logaritmo da luz incidente. A inclinação dessa curva é denominada *gama fotográfico*.

3.3 Representação e modelamento de imagens

A representação de imagens trata da caracterização da informação representada por cada *pixel*. Uma imagem pode representar as luminâncias de objetos em uma cena (como as imagens obtidas por uma câmara de vídeo convencional), as características de absorção de um tecido biológico (como em *imageamento* radiológico), a seção de choque de um objeto-alvo (como em radares), o perfil de temperatura de uma região (como em *imageamento* por infravermelho) ou o campo gravitacional em uma área (como em *imageamento* geofísico). Em geral, toda função bidimensional que contenha informação espacial pode ser apresentada na forma de uma imagem.

Uma questão importante na representação de imagens são os critérios de fidelidade ou inteligibilidade usados para avaliar a qualidade de uma imagem ou o desempenho de uma técnica de PDI. A especificação dessa avaliação exige modelos de percepção de contraste, freqüências espaciais, cor etc.

A luz recebida de uma cena por um sistema óptico produz uma imagem bidimensional que pode ser diretamente convertida em um sinal elétrico através de um sensor ou pode ser registrada fotograficamente e convertida posteriormente. Matematicamente, uma imagem pode ser definida como uma função $f(x, y)$ de duas variáveis, correspondentes às duas coordenadas espaciais no plano da imagem.

3.3.1 Digitalização

Quando uma imagem é digitalizada, um processo de amostragem é usado para extrair um conjunto discreto de números reais da mesma. Essas amostras correspondem aos tons de cinza numa matriz de pontos regularmente espaçados. As amostras são quantizadas em um conjunto finito de tons de cinza igualmente espaçados. O resultado da amostragem e da quantização é uma imagem digital (ROSENFELD & KAK, 1982a). Quanto mais precisa a amostragem e a quantização, melhor a imagem reproduzida. A taxa de amostragem (número de *pixels* por unidade de área) deve ser alta o suficiente de forma a preservar a informação contida na imagem.

3.3.2 Qualidade das imagens

A determinação da qualidade de uma imagem depende do propósito para o qual a imagem foi obtida. Há muitas maneiras de se medir a fidelidade de uma imagem $v(x, y)$ com relação à imagem original $u(x, y)$. Uma classe de métodos emprega medidas simples da similaridade ou da diferença entre u e v. Uma medida de diferença amplamente utilizada é o desvio médio quadrático:

$$emq = \sum_i \sum_j [u(i,j) - v(i,j)]^2. \tag{3}$$

Este tipo de medida não permite a distinção entre poucos grandes desvios e muitos pequenos desvios presentes nas imagens. Pode-se também utilizar outras medidas, como o desvio médio absoluto:

$$ema = \sum_i \sum_j |u(i,j) - v(i,j)|, \tag{4}$$

o desvio máximo absoluto:

$$e_{max} = máx|u - v|, \tag{5}$$

ou medidas de correlação entre as imagens u e v.

3.4 Realce de imagens

Os processos de realce de imagens consistem em uma coleção de técnicas que procuram melhorar a aparência de uma imagem ou mesmo converter essa imagem em uma forma mais adequada para análise humana ou automática. Em um sistema de realce de imagens, não há a intenção de se aumentar a fidelidade de uma imagem com relação a uma forma ideal, como ocorre na restauração de imagens (PRATT, 1978).

O realce de imagens tem como objetivo a acentuação de certas características das imagens, como bordas e contornos, para posterior análise ou visualização das mesmas, através de manipulação da escala de cinza, pseudocoloração, filtragem de ruído, aguçamento, interpolação e ampliação etc. O realce de imagens é útil na extração de atributos e na análise e visualização de imagens. O processo de realce não aumenta a quantidade de informação contida na imagem, mas aumenta a faixa dinâmica das características sob estudo, de forma que possam ser facilmente detectadas. A maior dificuldade no realce de imagens reside na quantificação do critério de realce. Na verdade, as técnicas de realce de imagens são empíricas e, em geral, empregam algoritmos interativos e fortemente dependentes da aplicação para produzirem resultados satisfatórios (JAIN, 1989).

Muitas técnicas de realce de imagens têm sido desenvolvidas para compensar os efeitos de processos específicos (conhecidos ou estimados) de degradação. Essas técnicas fazem uso intensivo de teoria de filtragem e são conhecidas como técnicas de restauração de imagens. Os métodos de realce de imagens mais elementares executam apenas operações de modificação da escala de cinza, remoção de borramento, suavização e filtragem de ruído. Nesses métodos, não se procura estimar o processo real de degradação da imagem, levando em consideração apenas propriedades gerais das degradações. O realce pode ser considerado um processo de supressão e ênfase de determinadas informações presentes na imagem (ROSENFELD & KAK, 1982a). Os filtros passa-baixas são adequados para suavização de ruído e interpolação, enquanto os filtros passa-altas são aplicados na detecção de bordas e em aguçamento de imagens.

Algumas técnicas de realce de imagens, como expansão de contraste, por exemplo, mapeiam cada tom de cinza para um outro valor, através de uma transformação predeterminada. No método de equalização histogrâmica, os tons de cinza de entrada são mapeados de forma a produzir uma imagem cuja distribuição dos tons de cinza seja uniforme, sendo um método muito poderoso para o realce de imagens de baixo contraste. Outras técnicas de realce realizam operações como convoluções, transfor-

madas discretas de Fourier e pseudocoloração, onde uma imagem em tons de cinza é mapeada em uma imagem colorida por meio da atribuição de cores às diferentes características presentes na imagem (JAIN, 1989).

Na prática, deve-se experimentar exaustivamente os métodos de realce existentes, a fim de se encontrar o mais adequado e eficiente. Na ausência de conhecimento sobre o processo de degradação, é difícil predizer a eficiência de cada um dos métodos. Muitas vezes, é necessário empregar combinações de métodos ou mesmo métodos ajustáveis, cujos parâmetros variem ao longo da imagem, dependendo do contexto local (ROSENFELD & KAK, 1982a).

3.4.1 Transformação da escala de cinza

As operações de transformação da escala de cinza, também conhecidas como operações de realce de contraste, são operações de memória zero, onde um dado nível de cinza u, pertencente ao intervalo [0, L], onde L é o valor máximo dos níveis de cinza (255, para uma imagem quantizada com 8 *bits*), é simplesmente mapeado para o nível de cinza v, também pertencente ao intervalo [0, L], de acordo com uma transformação genérica $v = f(u)$.

As operações de realce de contraste baseiam-se na modificação da escala de cinza das imagens, sendo divididas em dois grupos: (a) correção do nível de cinza, que corresponde à modificação dos níveis de cinza de pontos da imagem, com a finalidade de corrigir falhas na exposição de imagens; (b) transformação da escala de cinza, que tem o objetivo de modificar uniformemente a escala de cinza da imagem, com a finalidade de melhorar o contraste e tornar mais visíveis alguns detalhes da imagem (ROSENFELD & KAK, 1982a). Em ambos os casos, é necessário realizar uma análise dos efeitos da iluminação, uma vez que o brilho da cena é influenciado por vários fatores, incluindo-se a iluminação e a reflexibilidade da cena, que podem variar de ponto-a-ponto.

Se a escala de cinza da imagem fôr distorcida por uma transformação conhecida $v' = t(u)$, a distorção pode ser corrigida através da aplicação da transformação inversa $v = t^{-1}(u)$. Essa técnica pode ser empregada para corrigir os efeitos de não-linearidades de monitores e de filmes fotográficos (ROSENFELD & KAK, 1982a). Um dos defeitos mais comuns de imagens eletrônicas ou fotográficas é o pobre contraste que apresentam devido a uma faixa estreita e não linear de brilho. O contraste de uma imagem pode ser aumentado por meio do reescalonamento da amplitude de cada *pixel* (PRATT, 1978).

Correção do nível de cinza. A operação de correção do nível de cinza é utilizada quando é possível se determinar o mapeamento da exposição não-uniforme que produziu a imagem. Essa correção é direta, bastando-se substituir o nível de cinza de cada ponto por uma combinação entre o nível de cinza da imagem original e o nível de cinza da imagem correspondente ao mapeamento da iluminação incidente, a fim de obter o efeito de um mapeamento uniforme (ROSENFELD & KAK, 1982a). Essa operação pode ser denominada *correção da iluminação*.

Controle de brilho. Algumas vezes, a aparência de uma imagem pode ser melhorada através do ajuste de seu brilho. A operação de controle de brilho consiste em somar ou subtrair um valor constante aos *pixels* da imagem (LINDLEY, 1991). Algebricamente, essa operação aplicada a um *pixel* de intensidade v possui a seguinte forma:

$$v = v + b \tag{6}$$

onde b é a constante de brilho, que pode ser positiva ou negativa. Se b fôr negativa, o brilho diminui, enquanto que se b fôr positiva, o brilho aumenta.

Expansão de contraste. O contraste expressa a diferença em cor, refletância ou sombreamento entre duas áreas de uma imagem. Imagens de baixo contraste são caracterizadas como sendo predominantemente claras ou predominantemente escuras. Imagens de alto contraste, por outro lado, possuem regiões de escuridão juntamente com regiões muito claras, utilizando toda a faixa de níveis de cinza disponíveis em uma imagem com tons contínuos (LINDLEY, 1991). Imagens de baixo contraste são produzidas devido a pobres condições de iluminamento, a iluminamentos não-uniformes, ou mesmo devido à falta de linearidade e à estreita faixa dinâmica do sensor. Tipicamente, a expansão de contraste pode ser expressa como

$$v = \begin{cases} \alpha u, & 0 \le u < a \\ \beta(u-a) + v_a, \cdots & a \le u < b \\ \gamma(u-b) + v_b, & b \le u < L \end{cases} \tag{7}$$

onde α e γ correspondem às constantes de compressão, β corresponde à constante de expansão e v_a e v_b correspondem aos pontos de inflexão da função de expansão de contraste, sendo que a inclinação da transformação deve ser maior do que um na região de expansão. Os parâmetros a e b podem ser obtidos por meio de um exame do

histograma da imagem. Os intervalos de tons de cinza onde os *pixels* ocorrem com maior freqüência devem ser expandidos para aumentar a visibilidade global de uma cena (JAIN, 1989).

Uma técnica semelhante pode ser empregada se a maioria dos níveis de cinza da imagem se encontram no intervalo [a, b]. A transformação

$$v = \begin{cases} \frac{u_k - u_1}{b-a}(u-a) + u_1, & a \le u \le b \\ u_1, & \cdots \; u < a \\ u_k, & u > b \end{cases} \tag{8}$$

expande o intervalo [a, b] e comprime os intervalos [0, a] e [b, L], reduzindo estes últimos a simples pontos. Esse método apresenta bons resultados quando poucos pontos da imagem se localizam nos intervalos comprimidos, de forma que pouca informação é perdida.

À medida que o contraste de uma imagem aumenta, aumentam os detalhes *aparentes* da imagem, mas a quantidade de detalhes presentes na imagem não se altera.

Corte e limiarização. Um caso especial de expansão de contraste, onde os parâmetros α, β, γ e v_b da Eq. (7) são iguais a zero, é chamado de corte (*clipping*), que é bastante útil na supressão de ruído, quando se sabe que o sinal de entrada encontra-se na faixa [a, b]. A limiarização é um caso especial de corte, onde a = b = t e a imagem de saída é binária (JAIN, 1989).

Negativo. Uma imagem negativa é obtida pelo escalonamento reverso dos níveis de cinza, de acordo com a seguinte transformação

$$v = L - u \tag{9}$$

onde v é o novo valor do *pixel*, u é o valor original do *pixel* e L corresponde ao valor máximo de nível de cinza do sistema.

Nessa operação, as regiões claras da imagem são transformadas em regiões escuras e vice-versa. A transformação de uma imagem em seu negativo é útil quando se está investigando detalhes presentes em regiões claras de uma imagem, porque o olho

humano é mais sensível para distinguir detalhes em áreas escuras do que em áreas claras (LINDLEY, 1991).

Esta função é usada para transferir regiões de baixa luminância da imagem de entrada para porções mais lineares da faixa de resposta do monitor de vídeo, como no caso de um monitor que seja altamente não-linear em uma determinada região de sua faixa de resposta. As imagens negativas são de grande utilidade na visualização de imagens médicas e na produção de impressões negativas de imagens (JAIN, 1989).

Fatiamento de nível. O fatiamento permite a segmentação de certos níveis de cinza do restante da imagem. Essa técnica é muito útil quando diferentes características de uma imagem estão contidas em diferentes faixas de níveis de cinza (JAIN, 1989). Esta função permite o isolamento de uma faixa de tons de cinza da imagem de entrada.

Com fundo (*background*)
$$v = \begin{cases} L, & a \le u \le b \\ u, & u < a \text{ e } u > b \end{cases} \quad (10)$$

Sem fundo
$$v = \begin{cases} L, & a \le u \le b \\ 0, & u < a \text{ e } u > b \end{cases} \quad (11)$$

Compressão da banda. Em alguns casos, a faixa dinâmica de uma imagem é tão ampla que somente alguns *pixels* podem ser visualizados. Assim, a compressão da faixa dinâmica realça os *pixels* de pequena amplitude em comparação com aqueles de grande amplitude (JAIN, 1989). A faixa dinâmica pode ser comprimida através da transformação logarítmica

$$v = c \cdot \log_{10}\left(1 + |u|\right), \quad (12)$$

onde c é a constante de compressão.

Empobrecimento da escala. O empobrecimento da escala é uma operação de transformação da escala de cinza que tem por objetivo produzir uma imagem de saída com um número reduzido de níveis de cinza (DAVIS JR., 1992), mapeando faixas de níveis de cinza para um único valor, o que é de grande utilidade no realce e na segmentação de imagens.

3.4.2 Modelamento histogrâmico

O histograma de uma imagem representa a freqüência relativa de ocorrência dos vários tons de cinza em uma imagem. As técnicas de modelamento histogrâmico modificam uma imagem, de forma que seu histograma assuma a forma desejada. Essas técnicas são bastante úteis na expansão do contraste de imagens com histogramas estreitos (JAIN, 1989).

O histograma de luminância de uma imagem natural típica, linearmente quantificada, possui uma alta concentração de níveis escuros, ou seja, a maioria dos *pixels* possui uma luminância menor do que o valor médio do histograma. Em tais imagens, os detalhes presentes nas regiões escuras não são perceptíveis (PRATT, 1978). As transformações histogrâmicas podem ser necessárias nos seguintes casos (ROSENFELD & KAK, 1982a):

(a) Se fôr desejado quantizar uma imagem v em k níveis de forma a minimizar o erro de quantização, sendo que os k níveis devem ser próximos em regiões densamente populosas da escala de v, mas podem estar distantes em regiões esparsas da imagem;

(b) Quando se deseja comparar duas imagens v_1 e v_2, a fim de se detectar diferenças entre elas. Se as imagens foram obtidas sob diferentes condições de iluminamento, pode-se transformar a escala de cinza de uma ou de ambas as imagens, de forma a apresentarem histogramas padronizados;

(c) Quando se deseja medir certas propriedades de uma imagem v, a fim de classificá-la ou descrevê-la. Se essas propriedades dependerem dos níveis de cinza presentes em v, seus valores serão sensíveis às condições de iluminamento sob as quais v foi obtida. Essa sensibilidade pode ser reduzida através da normalização de v para uma forma padrão de histograma.

Equalização histogrâmica. Na equalização histogrâmica, o objetivo consiste em se obter um histograma uniforme para a imagem de saída. Calcula-se o valor médio dos níveis de cinza do histograma; partindo-se dos tons de cinza mais escuros, os *pixels* das bandas de quantificação são combinados, de forma que a soma dos mesmos seja o mais próxima possível do valor da média. Esses *pixels* são reescalonados e o processo é repetido para todo o histograma.

Quando o histograma de uma imagem é transformado de forma que todos os níveis de cinza ocorram com a mesma freqüência, o resultado é uma imagem de contraste mais elevado. A equalização ou nivelamento histogrâmico é uma forma de normalizar e mesmo de realçar imagens. Ao nivelar um histograma, os pontos de regiões densamente populadas da escala de cinza são forçados a ocupar um maior número de tons de cinza, equivalendo a uma expansão do contraste, enquanto os pontos de regiões esparsas são forçados a ocupar menos níveis de cinza, sofrendo compressão, de forma a caracterizar um realce de contraste. Algumas vezes, a equalização histogrâmica comporta-se como uma técnica muito severa, mapeando grandes regiões de níveis de cinza, situados no final da escala, em um único tom (ROSENFELD & KAK, 1982a).

3.4.3 Suavização

As operações de suavização são empregadas para reduzir os efeitos espúrios produzidos sobre uma imagem em função de um sistema de amostragem deficiente ou de um canal de transmissão com ruído. Muitas técnicas de suavização de imagens são baseadas em operações espaciais aplicadas sobre vizinhanças locais de *pixels*. Freqüentemente, a imagem sofre uma espécie de convolução de uma máscara (JAIN, 1989). A supressão do ruído presente em uma imagem pode ser conseguida através da aplicação de operadores de suavização invariantes ao longo da imagem.

A dificuldade básica no uso de técnicas de suavização e remoção de ruído é que, se aplicadas de forma indiscriminada, tendem a borrar a imagem. Se o ruído ocorrer em regiões conhecidas ou se fôr possível distinguir o ruído do resto da imagem, torna-se relativamente fácil remover o ruído sem causar degradações, desde que se possa operar somente o ruído, deixando intacto o resto da imagem. Os filtros de suavização mais conhecidos são: média, média ponderada, moda, mediana, k-vizinhos, sigma, filtros baseados em valores de *pixels* e em gradientes e filtros da máxima homogeneidade (NIBLACK, 1986).

Média de uma vizinhança. Se apenas uma cópia da imagem com ruído fôr disponível, pode-se tentar reduzir o nível de ruído por meio do cálculo da média local. Essa técnica é bastante eficiente quando o ruído apresenta uma granulação menor que o menor detalhe presente na imagem. Uma imagem pode ser suavizada por meio da substituição do valor de cada *pixel* pelo valor da média da vizinhança desse *pixel*. Estabelecendo-se que a mesma vizinhança deve ser considerada para todos os *pixels* da imagem, torna-se evidente que se trata de uma operação invariante com a posição do

pixel na imagem, ou seja, uma operação local. Uma técnica alternativa consiste no cálculo da média ponderada da vizinhança, ou seja, uma média onde os pontos possuam pesos que decrescem à medida que se afastam do centro da vizinhança.

Nesta técnica, cada *pixel* é substituído por uma média ponderada do valor dos *pixels* vizinhos

$$v(x,y) = \sum_{(i,j)\in W}\sum a(i,j)u(x-i,y-j) \tag{13}$$

onde $u(x, y)$ e $v(x, y)$ são as imagens de entrada e de saída, respectivamente. W é a janela escolhida e $a(i, j)$ são os pesos do filtro. A classe mais comum de filtros da média possui pesos iguais, resultando em

$$v(x,y) = \frac{1}{N_W}\sum_{(i,j)\in W}\sum u(x-i,y-j) \tag{14}$$

onde N_W é o número de *pixels* da janela.

As dimensões da vizinhança a ser considerada na operação de média local depende do grau de redução de ruído que se deseja obter. A média de n pontos reduz o desvio padrão do ruído por um fator de $n^{1/2}$. Se o ruído fôr dependente do sinal, pode-se usar uma vizinhança diferente em cada ponto, dependendo do tom de cinza médio na proximidade de cada ponto, de forma a obter uma redução uniforme do ruído ao longo da imagem (ROSENFELD & KAK, 1982a).

Para suavizar uma imagem sem causar borramento (*blurring*), pode-se utilizar outras operações não-lineares que empreguem o cálculo da média. A classe mais simples de tais operações combina o cálculo da média com limiarização. Outra técnica consiste no cálculo da média de forma isotrópica nos pontos onde não haja bordas e no cálculo da média apenas ao longo da borda nas regiões em que ela esteja presente (ROSENFELD, 1969).

Filtro da mediana. Uma das principais deficiências do filtro da média é que essa técnica borra as bordas e outros detalhes agudos presentes nas imagens. Uma técnica alternativa consiste no emprego da filtragem da mediana, na qual o nível de cinza de cada *pixel* é substituído pela mediana dos níveis de cinza de uma vizinhança do *pixel*, em lugar de ser substituído pela média dessa vizinhança

$$v(x,y) = mediana\{y(x-i,y-j),(i,j) \in W\} \tag{15}$$

onde W é a vizinhança escolhida. O algoritmo para filtragem da mediana requer que se ordene os valores dos *pixels* da janela em ordem crescente ou decrescente e que se extraia o valor central. Esse método de filtragem é particularmente eficiente quando o ruído consiste de componentes intensos com a forma de impulsos e, principalmente, onde se deseja preservar a nitidez das bordas (GONZALEZ & WINTZ, 1987). O filtro da mediana possui as seguintes propriedades:

(a) É um filtro não-linear;

(b) É eficiente na remoção de linhas ou *pixels* isolados, preservando-se a resolução espacial. O filtro da mediana apresenta um bom desempenho em imagens contendo ruído binário, mas não é eficiente quando o ruído é do tipo gaussiano;

(c) O desempenho desse filtro é fraco quando o número de *pixels* com ruído na janela é maior ou igual à metade do número total de *pixels* da janela.

Soma das Diferenças Absolutas (SDA). O método de Suavização por Soma das Diferenças Absolutas (SSDA) (ARAÚJO, 1985) consiste numa técnica de filtragem passa-baixas baseada na máxima homogeneidade de vizinhanças selecionadas. A vizinhança é selecionada em função de um parâmetro de quantificação da homogeneidade de diferentes regiões que contêm o *pixel* considerado. Esse procedimento evita que variações bruscas de nível de cinza, como as que ocorrem na presença de bordas, sejam interpretadas como ruído (DAVIS JR., 1992).

No SSDA, o índice de homogeneidade de cada vizinhança corresponde ao somatório das diferenças absolutas entre cada um dos elementos da vizinhança e o *pixel* central

$$SDA(k) = \sum_{i=1}^{9} |p(i) - p(c)| \tag{16}$$

onde k é a vizinhança (k = 1, 2, ..., 9), $p(i)$ é o i-ésimo elemento da vizinhança e $p(c)$ é o *pixel* central. O *pixel* central é substituído pela média dos valores dos *pixels* da vizinhança que apresentar menor SDA. Essa técnica de cálculo de homogeneidade é bem

mais eficiente do que o cálculo da variância proposto no filtro de Nagao-Matsuyama (NAGAO & MATSUYAMA, 1979), por não exigir um grande volume de cálculos em ponto flutuante, excetuando-se o cálculo da média (ARAÚJO, 1986) (ARAÚJO *et al.*, 1990).

Média de múltiplas imagens. Calculando-se a média de um conjunto de cópias independentes de uma imagem com ruído, pode-se atenuar o ruído sem que se atenue a própria imagem. Essa média pode ser calculada também por superposição óptica. Entretanto, uma vez que isso requer o alinhamento perfeito das imagens, essa técnica é adequada somente se o número de imagens não fôr muito grande. Uma vez que a operação de média borra a imagem, esse método deve ser empregado com cuidado, para evitar a degradação de detalhes agudos, como linhas ou bordas.

Para compreender o princípio teórico que fundamenta o método da superposição, suponha que a imagem u tenha sido degradada por um ruído aditivo, cujo valor obedece a uma distribuição normal, com média zero e variância σ^2. O valor da imagem com ruído em qualquer ponto (x, y) será distribuído de forma normal, com média $\bar{u}$ e variância σ^2. Supondo-se que N cópias da imagem possam ser obtidas de uma forma tal que a distribuição do ruído nessas cópias seja completamente independente, o valor da média das N cópias no ponto (x, y) obedecerá a uma distribuição normal, com média $\bar{u}$ e variância σ^2/n. De uma forma semelhante, a imagem de um objeto simétrico pode ser melhorada pela superposição de cópias de uma imagem que tenha sido girada em torno de seu eixo de simetria. Essa técnica de superposição multiplicativa de uma mesma imagem pode ser considerada um bom método de se melhorar o contraste das imagens (ROSENFELD, 1969).

Suavização direcional. Para proteger as bordas de sofrer borramento durante a suavização, um filtro da média direcional pode ser bastante útil. As médias direcionais $v(x, y: \theta)$ são calculadas em várias direções

$$v(x,y:\theta) = \frac{1}{N_\theta} \sum_{(i,j)\in W_\theta}\sum u(x-i, y-j) \tag{17}$$

e a direção θ^* é escolhida de forma que $|u(x,y) - v(x,y:\theta)|$ seja mínimo. Então, $v(x, y) = v(x, y: \theta)$ fornece o resultado desejado.

Filtragem passa-bandas no domínio da freqüência. Outra forma de suavizar uma imagem consiste em se suprimir as altas freqüências espaciais de sua transformada de Fourier e obter a transformada inversa do resultado. Tal filtragem passa-baixas também produz borramento da imagem, o que é bastante indesejável. Todavia, é possível suprimir-se o ruído de uma imagem eliminando-se uma banda de freqüências e conservando-se uma quantidade suficiente de altas freqüências, de forma a preservar as bordas presentes na imagem. Quando uma imagem contém um ruído de forma periódica, esse ruído usualmente pode ser suprimido eliminando-se pequenas regiões da transformada de Fourier da imagem com ruído. Além disso, a granularidade presente em uma imagem pode ser suavizada, mesmo quando os grãos não são regularmente espaçados entre si, por meio da atenuação da banda de freqüências correspondente ao tamanho dos grãos (ROSENFELD, 1969).

3.4.4 Aguçamento

Assim como é possível suavizar ou borrar uma imagem de várias formas, há também muitas maneiras de se aguçar ou melhorar a nitidez de imagens. Imagens digitalizadas através de varredura eletrônica, por exemplo, podem ter suas bordas aguçadas submetendo-se o sinal a um filtro passa-altas.

O borramento é uma operação de média ou integração, o que sugere que é possível suprimi-lo através de operações de diferenciação. O borramento enfraquece as altas freqüências espaciais, o que indica que as imagens podem ser aguçadas reforçando-se as altas freqüências espaciais. Entretanto, quando uma imagem apresenta ruído e borramento, a diferenciação e a filtragem de reforço de altas freqüências não podem ser empregadas indiscriminadamente, pois o ruído envolve altas taxas de variação dos tons de cinza e pode tornar-se mais forte que o sinal da imagem nas altas freqüências. Alternativamente, pode-se tentar remover ou reduzir o ruído antes de se aguçar a imagem (ROSENFELD & KAK, 1982a).

Diferenciação. É interessante construir operadores derivativos isotrópicos, ou seja, invariantes com a rotação. Esses operadores devem ser isotrópicos porque é desejável aguçar características borradas, como bordas e linhas, que ocorram em qualquer direção. A filtragem de reforço de altas freqüências, quando empregada juntamente com uma transformação logarítmica da escala de cinza, pode ser usada para reduzir os efeitos de sombreamento, devidos à variação da iluminação, sem degradar detalhes da imagem (ROSENFELD & KAK, 1982a).

Diferenciação estatística. Esta técnica de realce de bordas envolve a geração de uma imagem realçada multiplicando-se o valor de cada *pixel* da imagem original pelo valor do desvio padrão da imagem, σ, de acordo com a relação

$$v(x,y) = u(x,y) \cdot \sigma(x,y) \tag{18}$$

onde o desvio padrão é calculado sobre a vizinhança $W(i, j)$ do *pixel*

$$\sigma^2 = \sum_i \sum_j \left[u(i,j) - \bar{u}_{i,j} \right]^2 \tag{19}$$

onde i e $j \in W(i, j)$ e a função $\bar{u}_{i,j}$ corresponde ao valor médio da imagem original.

A imagem melhorada $v(x, y)$ terá sua amplitude aumentada nos pontos da borda que se distinguirem muito de seus vizinhos. Uma desvantagem desse método é que os componentes do ruído podem ser identificados como bordas (PRATT, 1978).

Gradiente. Se o aguçamento é necessário somente numa direção particular, pode-se aplicar um operador derivativo direcional. Na maioria dos casos, entretanto, deseja-se aguçar a imagem em todas as direções, o que pode ser conseguido aplicando-se o operador derivativo na direção do gradiente, que corresponde à direção em que os níveis de cinza mudam mais rapidamente (ROSENFELD, 1969).

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \bar{j} \tag{20}$$

onde $\bar{i}$ e $\bar{j}$ são vetores unitários nas direções x e y.

O operador gradiente aplicado a uma função contínua produz um vetor ponto-a-ponto com a direção da máxima variação da função no ponto e cuja magnitude corresponde à amplitude dessa variação (NIBLACK, 1986).

Laplaciano. Um método especialmente simples de calcular opticamente o Laplaciano baseia-se no fato de que a obtenção do Laplaciano de f é aproximadamente equivalentente à subtração de uma cópia borrada de f, correspondendo a uma técnica fotográfica conhecida como *unsharp masking* (mascaramento não-agudo). Nessa

técnica, uma transparência positiva e uma transparência negativa borrada da imagem são superpostas, sendo registrada em papel fotográfico a luz que atravessa as duas transparências (ROSENFELD, 1969).

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{21}$$

O operador Laplaciano produz um escalar que informa apenas a magnitude da variação do valor em cada ponto. Por outro lado, esse operador difere dos demais métodos de realce por ser omnidirecional, ou seja, ele acentua as bordas, independentemente da direção das mesmas.

Unsharp masking (mascaramento não-agudo). Nesse método de aguçamento de imagens, a imagem é digitalizada duas vezes, uma com resolução normal e outra com uma resolução inferior, resultando nas imagens $u(x, y)$ e $u_L(x, y)$, respectivamente. Uma imagem mascarada é obtida a partir da seguinte operação entre as duas imagens:

$$v_M(x,y) = k \cdot u(x,y) - (1-k) \cdot u_L(x,y) \tag{22}$$

onde k é uma constante de proporcionalidade, tipicamente entre 3/5 e 5/6, de forma que a razão entre os componentes da imagem normal e da imagem de baixa resolução varia de 1,5:1 a 5:1 (PRATT, 1978).

3.4.5 Pseudocoloração

A pseudocoloração é uma técnica de mapeamento de cores, de grande utilidade na identificação de objetos em uma imagem. Em um mapeamento pseudocolorizado, a imagem resultante não corresponde a uma imagem colorida, mas sim a um arranjo bidimensional de valores convertidos para um plano colorido (PRATT, 1978). A principal motivação para o uso de cores em processamento de imagens deve-se ao fato do olho humano poder discernir milhares de cores e intensidades diferentes, enquanto somente de uma a duas dúzias de níveis de cinza podem ser diferenciados numa imagem.

3.5 Restauração de imagens

Toda imagem capturada por meios ópticos, eletro-ópticos ou eletrônicos sofre alguma degradação pelo sensor. As degradações podem ser devidas a ruídos no sensor, borramento devido à desfocalização da câmara, movimento relativo entre a câmara e o objeto, turbulência atmosférica etc. A restauração de imagens relaciona-se com a filtragem da imagem, a fim de minimizar o efeito das degradações. A eficiência dos filtros de restauração de imagens depende da extensão e da precisão do conhecimento do processo de degradação, bem como do critério de avaliação empregado no projeto do filtro. O erro médio quadrático é um critério freqüentemente empregado. Entretanto, sua validade como uma medida global da fidelidade visual é questionável, fornecendo uma medida local razoável e sendo tratável matematicamente. Outros critérios menos freqüentemente empregados são a média quadrática ponderada e a entropia máxima (JAIN, 1989).

A restauração de imagens refere-se à remoção ou à minimização de degradações conhecidas em uma imagem. Isto inclui o *deblurring* de imagens degradadas por limitações do sensor ou por características ambientais, filtragem de ruídos e correção de distorções geométricas ou não-linearidades produzidas pelos sensores (JAIN, 1989). A restauração de imagens difere do realce de imagens à medida que o realce trata da acentuação de características presentes nas imagens, em lugar da restauração de degradações. As técnicas de restauração dependem somente das propriedades de um conjunto de dados, enquanto as técnicas de realce de imagens são mais dependentes da imagem de entrada.

3.5.1 Modelos de ruído

As imagens estão sujeitas a diferentes tipos de ruídos. Alguns desses ruídos são independentes do sinal, outros não, alguns são correlacionados ponto-a-ponto, enquanto outros são coerentes. Quando uma imagem é transmitida por um meio qualquer, é introduzido um ruído no canal, cujo valor é independente da intensidade do sinal da imagem. Um tipo importante de ruído presente em imagens digitais é o ruído de quantização (ou erro de quantização), que corresponde à diferença entre a imagem quantizada e a imagem original.

Ruído de granulação do filme. Durante a exposição e a revelação de um filme fotográfico, os grânulos de halóide de prata expostos à luz são convertidos em

grânulos de prata metálica. Esse processo, todavia, não é completamente determinístico, pois os grânulos de halóide de prata sujeitos a uma exposição equivalente não são necessariamente convertidos em grânulos da mesma forma e dimensão e, além disso, esses grânulos de prata são distribuídos de uma forma aleatória sobre a superfície do filme. Esse caráter aleatório da formação dos grânulos, denominado ruído de granulação do filme, torna indeterminada a quantidade de luz que é absorvida pela emulsão fotográfica (PRATT, 1978).

Restauração do ruído de granulação do filme. O ruído de granulação do filme é um fator limitador na restauração de imagens registradas em filmes fotográficos, especialmente no caso de imagens submetidas a grandes ampliações. Um método de restauração não-linear para combater os efeitos do ruído de granulação do filme denomina-se *noise cheating* (despistamento do ruído). Nessa técnica, uma imagem é digitalizada com alta resolução e cada *pixel* é quantificado com precisão. Os *pixels* de alta resolução são então combinados em grupos de dois por dois *pixels*, sem que haja sobreposição entre os grupos, de forma a produzir uma imagem de resolução inferior. A imagem de alta resolução garante, naturalmente, uma melhor identificação de bordas que a imagem de baixa resolução, mas apresenta uma maior variância do ruído. Se o ruído presente na imagem fôr do tipo ruído branco, a variância do ruído por *pixel* da imagem de baixa resolução será igual a 25 % da variância da imagem de alta resolução, por sofrer um processo de média espacial durante a operação de redução da resolução. A imagem de baixa resolução resultante é novamente quantificada numa escala uniforme, escolhida de forma que os níveis de quantificação sejam espaçados entre si por quatro unidades de desvio padrão do ruído. Essa medida garante um índice de 95 % de acerto na quantificação para imagens com ruído gaussiano. A imagem de baixa resolução é examinada por meio de uma janela de 3 × 3 *pixels*. Se os oito *pixels* da periferia dessa janela possuírem o mesmo valor e o do centro fôr diferente, esse *pixel* central é considerado como portador de ruído e é ajustado para o valor de sua vizinhança. Se esse *pixel* central da janela fôr um *pixel* de uma borda na imagem, ele é subdividido em quatro pontos de alta resolução, cujos valores correspondem aos *pixels* da imagem de alta resolução. Daí, uma estratégia bem simples consiste em atribuir para esses pontos de alta resolução o valor do vizinho 4-conectado mais próximo (PRATT, 1978).

Processamento de imagens pontilhadas (*speckled*). Quando uma radiação monocromática sofre espalhamento por uma superfície cuja rugosidade é da ordem de um comprimento de onda dessa radiação, é produzido um ruído pontilhado. Esse ruído é observado em imagens produzidas por radiações coerentes, desde a região de

microondas até a região de luz visível do espectro eletromagnético. A presença de ruído pontilhado em um sistema de *imageamento* reduz sua resolução, particularmente para imagens de baixo contraste. Assim, a supressão do ruído pontilhado é vital em sistemas de *imageamento*. O problema de redução do pontilhamento difere da suavização de ruídos aditivos porque o ruído pontilhado não é do tipo aditivo (JAIN, 1989).

Redução de pontilhamento: Método *N-Look*. Um método bastante simples de se reduzir o pontilhamento consiste na obtenção de várias imagens estatisticamente independentes do mesmo objeto e no cálculo da média dessas imagens (JAIN, 1989).

Média espacial do pontilhamento. Se o número de imagens disponíveis do objeto, N, fôr reduzido, é desejável a aplicação de algum tipo de filtragem espacial para suprimir-se o ruído de pontilhamento (JAIN, 1989). O aumento da razão de contraste obtida através desse método é compatível com o valor produzido pelo método *N-Look*, exceto que se verifica uma perda de resolução.

3.5.2 Critérios de fidelidade de imagens

Os critérios de fidelidade de imagens são úteis para avaliação da qualidade e do desempenho de uma técnica de processamento ou de um sistema de visão. Há dois tipos de critérios que são utilizados para avaliação da qualidade de imagens: subjetivo e quantitativo. Os critérios subjetivos usam escalas graduadas como escalas de excelência e escalas de deterioração. Uma escala de excelência pode ser global ou por grupos. A escala de deterioração classifica uma imagem em função do nível de degradação presente na imagem, quando comparada com uma imagem ideal. Essa escala é útil em aplicações como codificação de imagens, onde a presença de codificação introduz degradação na imagem de saída.

Dentre as medidas quantitativas, uma classe de critérios usados é chamada de critério dos quadrados médios, que se refere a alguma espécie de média ou soma (ou integral) dos quadrados do erro entre duas imagens. Em muitas aplicações, o erro médio quadrático é expresso em termos de uma relação sinal/ruído, definida em decibéis como

$$SNR = 10\log_{10}\frac{\sigma^2}{\sigma_a^2}, \tag{23}$$

onde σ^2 é a variância da imagem de referência e,

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{MN}\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} E\left[\left|u(x,y) - \bar{u}(x,y)\right|^2\right] \tag{24}$$

onde E corresponde à *esperança matemática.*

Uma outra definição de SNR, comumente utilizada em codificação de imagens é

$$SNR' = 10\log_{10}\frac{(\text{valor pico - a - pico da imagem de referência})^2}{\sigma_a^2} \tag{25}$$

sendo que esta definição resulta em um valor de SNR' aproximadamente 12 a 15 *dB* superior ao valor de SNR (JAIN, 1989).

3.6 Análise de imagens

A análise de imagens está relacionada com o estudo de técnicas de extração de atributos, de segmentação e de classificação (JAIN, 1989).

3.6.1 Extração de atributos

Os atributos espaciais de um objeto podem ser caracterizados por seus tons de cinza, suas atribuições de probabilidade, suas distribuições espaciais etc. Os atributos naturais de uma imagem são o brilho de uma região de *pixels*, o contorno de objetos e a textura de regiões. Os histogramas e os espectros de freqüência espacial de imagens são alguns atributos artificiais de imagens.

Atributos de amplitude. Os atributos mais simples e mais úteis de um objeto são as amplitudes de suas propriedades fisicas, como reflexividade, transmissibilidade, luminância, cor ou resposta multiespectral. Em *imageamento* radiográfico, p. ex., a amplitude do nível de cinza representa as características de absorção dos tecidos e possibilita a discriminação entre ossos e outros tecidos ou entre tecidos sadios e tecidos doentes. Alterações ou descontinuidades em atributos de imagens, como luminância, cor ou textura são características fundamentais, pois permitem a identificação de objetos presentes nas imagens. Descontinuidades locais na luminância ou na amplitude de uma imagem são denominadas bordas de luminância.

Atributos histogrâmicos. Atributos histogrâmicos baseiam-se no histograma de uma região da imagem. Um histograma estreito indica uma região de baixo contraste. A forma do histograma de uma imagem fornece informações que permitem a caracterização dessa imagem. Um histograma estreitamente distribuído, p. ex., indica uma imagem de baixo contraste, enquanto um histograma bimodal sugere a presença de regiões de diferentes brilhos. As seguintes medidas são empregadas como um meio de descrever a forma de histogramas de primeira ordem:

Média: $$\bar{b} = \sum_{b=0}^{L} bP(b) \tag{26}$$

Variância: $$\sigma_b^2 - \sum_{b=0}^{L} (b - \bar{b})^2 P(b) \tag{27}$$

Assimetria: $$b_s = \frac{1}{\sigma_b^3} \sum_{b=0}^{L} (b - \bar{b}^3) P(b) \tag{28}$$

*Kurtosis**: $$b_k = \frac{1}{\sigma_b^4} \sum_{b=0}^{L} (b - \bar{b}^4) P(b) - 3 \tag{29}$$

Energia: $$b_N = \sum_{b=0}^{L} [P(b)]^2 \tag{30}$$

Entropia: $$b_E = \sum_{b=0}^{L} P(b) \log_2 [P(b)] \tag{31}$$

O fator três presente na expressão da medida de Kurtosis normaliza b_k para zero no caso de uma distribuição gaussiana com média igual a zero.

Atributos métricos (ou de forma). A forma de um objeto refere-se ao seu perfil e à sua estrutura física. Essas características podem ser representadas por contornos, momentos e atributos estruturais (JAIN, 1989).

* Kurtosis: *Estat*. Medida da concentração de uma distribuição em torno de sua média.

Perímetro. Para obter o perímetro de um subconjunto, pode-se percorrer suas bordas e medir a distância total percorrida (ROSENFELD, 1969).

$$T = \int \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}dt \tag{32}$$

onde t é um parâmetro do contorno que não necessariamente o comprimento.

Área. A área de um subconjunto de uma imagem digital corresponde ao número de elementos desse subconjunto e pode ser obtida contando-se o número de elementos que satisfazem à função característica do subconjunto.

$$A = \iint_{\Re} dx \cdot dy = \int_{\partial\Re} y(t)\frac{dx(t)}{dt}dt - \int_{\partial\Re} x(t)\frac{dy(t)}{dt}dt \tag{33}$$

Distância. Trivialmente, pode-se medir a altura ou a largura de um subconjunto de uma imagem como sendo a distância entre as linhas horizontais mais altas e as linhas mais baixas, ou entre as linhas verticais mais à direita e as linhas mais à esquerda. A maior extensão de um subconjunto em qualquer direção é chamada de diâmetro, isto equivale à maior distância entre dois pontos quaisquer do subconjunto (ROSENFELD & KAK, 1982b).

Radii R_{min} *e* R_{max}. Distâncias mínima e máxima, respectivamente, das bordas ao centro de massa. Algumas vezes, a razão R_{max}/R_{min} é usada como uma medida da excentricidade ou alongamento do objeto.

Redondeza ou compacidade.

$$O = \frac{(perímetro)^2}{4\pi(área)} \tag{34}$$

Para um disco, O é mínimo e igual a 1.

3.6.2 Detecção de bordas

Uma borda é uma fronteira entre duas regiões de diferentes níveis de cinza. A borda ideal equivale a uma função degrau, que pode ser aguda ou difusa. Os filtros de realce e detecção de bordas são opostos aos filtros de suavização, pois enquanto esses últimos são filtros do tipo passa-baixas, os detectores de bordas são filtros passa-altas,

cujo efeito é realçar ou intensificar as bordas (NIBLACK, 1986). Características locais de imagens envolvem mudanças bruscas nos tons de cinza, podendo apresentar várias formas geométricas (ROSENFELD & KAK, 1982b):

(a) *Borda*. O nível de cinza é relativamente consistente em cada uma das duas regiões adjacentes e troca abruptamente de valor na fronteira entre as duas regiões;

(b) *Linha ou curva*. O nível de cinza é relativamente constante, exceto ao longo de uma faixa estreita. Na seção de cruzamento é produzido um pulso;

(c) *Spot*. O nível de cinza é relativamente constante, exceto em um único ponto.

Uma técnica comum para detecção de bordas monocromáticas consiste no realce das bordas de uma imagem $u(x, y)$ por meio de processamento linear ou por meio de processamento não-linear, para produzir uma imagem $v(x, y)$ com regiões de brilho realçado. Em seguida, uma operação de limiarização é aplicada para determinar a localização das bordas. Os valores de limiar aplicados podem variar espacialmente a fim de compensar grandes alterações de luminância espacial. A seleção desse limiar é um ponto-chave na detecção de bordas, pois um limiar muito alto não permite a detecção de elementos de baixa amplitude, enquanto um limiar muito baixo faz com que ruídos presentes na imagem sejam detectados como se fossem bordas (PRATT, 1978).

A detecção de bordas é um problema de importância fundamental em análise de imagens. As bordas caracterizam as fronteiras dos objetos e são úteis para segmentação, registro e identificação de objetos em cenas (JAIN, 1989).

Métodos lineares de realce de bordas. O aguçamento de bordas horizontais pode ser obtido por meio de uma operação de diferença, que produz uma imagem de saída que atende à relação

$$v(x,y) = u(x,y) - u(x,y+1) \tag{35}$$

e, semelhantemente, o aguçamento vertical resulta da operação

$$v(x,y) = u(x,y) - u(x+1,y). \tag{36}$$

O aguçamento diagonal, por sua vez, pode ser obtido através da subtração de pares diagonais de *pixels*. O resultado dessas operações corresponde a uma medida da inclinação do brilho da imagem; ou seja, em uma área cuja intensidade dos *pixels* é constante, a subtração produzirá um valor nulo, resultando em *pixels* escuros, enquanto que em uma região com variações bruscas de intensidade, como numa borda, p. ex., a subtração resultará num valor alto, correspondendo a um *pixel* claro. Assim, quanto maior a diferença nas intensidades dos *pixels*, mais claro o *pixel* resultante (LINDLEY, 1991).

A diferenciação discreta bidimensional pode ser realizada através da convolução de uma máscara de gradiente. O aguçamento de bordas, independentemente da orientação das bordas, pode ser conseguido através de uma máscara Laplaciana. O aguçamento de bordas pode também ser feito proporcional à correlação estatística dos valores dos *pixels*, por meio de uma máscara estatística (PRATT, 1978).

Métodos não-lineares de realce de bordas. Sistemas não-lineares de detecção de bordas empregam combinações não-lineares de *pixels* como uma forma de realçar a borda antes de se aplicar a limiarização. A maioria das técnicas existentes são limitadas ao processamento de máscaras 2 × 2 ou 3 × 3. O operador de Roberts implementa uma operação cruzada não-linear, como um método de diferenciação bidimensional para realce e detecção de bordas. O operador de Sobel corresponde a um método não-linear de realce de bordas descrito pela convenção de numeração representada a seguir:

A_0	A_1	A_2
A_7	v(i,j)	A_3
A_6	A_5	A_4

sendo que o plano de realce de bordas é definido como

$$u(i,j) = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{37}$$

onde

$$X = (A_2 + 2A_3 + A_4) - (A_0 + 2A_7 + A_6) \tag{38}$$

$$Y = (A_0 + 2A_1 + A_2) - (A_6 + 2A_5 + A_4). \tag{39}$$

Outro esquema não-linear de detecção de bordas baseia-se no processamento de imagens homomórficas (PRATT, 1978). De acordo com esse esquema, uma borda existe se a magnitude do logaritmo da luminância da imagem num dado *pixel* ultrapassa a magnitude logarítmica média de seus quatro vizinhos mais próximos, além de um valor fixo de limiar.

Há três tipos principais de erros associados com a localização de uma borda: (a) falta de pontos válidos para caracterizar uma borda; (b) falha ao localizar pontos da borda; (c) classificação de pulsos de ruído como pontos de bordas (PRATT, 1978). Pode-se reduzir os efeitos do ruído sobre as respostas dos operadores de detecção de bordas suavizando-se a imagem antes de se aplicar o operador. Em particular, pode-se suavizar pela média ou pode-se aplicar um operador que calcule diferenças de médias locais (ROSENFELD & KAK, 1982b).

Desempenho dos operadores de detecção de bordas. Quantitativamente, o desempenho de um operador de detecção de bordas, na presença de ruído, pode ser medido da seguinte forma:

Seja n_0 o número declarado de *pixels* da borda e n_1 o número de *pixels* removidos ou adicionados à borda devido à ação de um ruído aditivo. Se n_0 é mantido fixo, tanto para imagens sem ruído, como para imagens com ruído, a taxa de erro na detecção é

$$P_e = \frac{n_1}{n_0}. \tag{40}$$

Outra figura de mérito para o desempenho dos operadores de detecção de bordas é a quantidade

$$P = \frac{1}{máx(N_I, N_D)} \sum_{i=1}^{N_D} \frac{1}{1 + \alpha \cdot d_i^2} \tag{41}$$

onde d_i é a distância entre um *pixel* declarado como borda e o *pixel* da borda ideal mais próximo, α é uma constante de calibração, e N_I e N_D são o número ideal e o número de *pixels* declarados, respectivamente.

3.6.3 Segmentação de imagens

A segmentação de imagens refere-se à decomposição de uma cena em seus componentes. Em sistemas de análise automática de imagens, a segmentação é a operação responsável pela extração dos componentes da cena para posterior descrição ou reconhecimento. Os algoritmos de segmentação baseiam-se, basicamente, em duas propriedades dos níveis de cinza de uma imagem: (a) descontinuidade e (b) similaridade. Nos algoritmos baseados na descontinuidade dos níveis de cinza, a imagem é segmentada em função de mudanças bruscas nos níveis de cinza, permitindo a identificação de pontos, linhas e bordas presentes na imagem. Os algoritmos baseados na similaridade dos níveis de cinza, por sua vez, segmentam a imagem em função de limiares, de crescimento de regiões ou de partição e aglomeração de regiões (ANDRADE, 1993). O caso mais simples de segmentação ocorre quando se tem apenas duas regiões: o objeto e o fundo. O caso mais complexo é aquele onde se tem vários objetos contra um fundo. O processo de segmentação não trata do que as regiões representam, mas apenas da forma de particionar uma imagem (NIBLACK, 1986).

Limiarização Fixa. Subconjuntos de uma imagem f podem ser definidos através da aplicação do operador limiar à imagem, como um operador identidade. Se a imagem f é uma função aproximadamente contínua, subconjuntos com formas de linhas e pontos podem ser obtidos através da separação de conjuntos de pontos cujos níveis de cinza encontram-se entre dois limiares próximos; essas imagens podem ser chamadas de *isofotos* (ROSENFELD, 1969).

Algumas imagens são compostas de duas classes de regiões que ocupam diferentes faixas de níveis de cinza. O histograma de tais imagens possui dois picos correspondentes às duas regiões. Desta forma, a imagem pode ser segmentada escolhendo-se um limiar que separe esses picos. Os histogramas que possuem dois picos são chamados de *bimodais*.

Se uma imagem possui mais que duas classes de regiões, pode-se segmentá-la aplicando-se diferentes valores de limiares, num processo conhecido como *limiarização multinível*. Um histograma que possui vários picos é chamado de *multimodal*. Naturalmente, à medida que o número de classes de regiões aumenta, os picos tornam-se mais difíceis de serem distinguidos e a segmentação por limiarização torna-se mais crítica (ROSENFELD & KAK, 1982b).

A limiarização da amplitude é útil quando os atributos de amplitude são suficientes para caracterizar o objeto. Os valores de atributos de amplitude são calibrados de tal forma que um dado intervalo de amplitude representa uma única característica de um objeto. As técnicas de limiarização são úteis na segmentação de imagens binárias, como documentos impressos, desenhos e gráficos, bem como na segmentação de imagens multiespectrais e coloridas, imagens radiográficas etc.

Limiarização variável. Em muitas situações, não existe um único valor de limiar que seja capaz de produzir uma boa segmentação em toda a imagem, como numa figura que represente objetos escuros contra um fundo claro, sob condições de iluminação não-uniforme. O mesmo se aplica a cenas contendo sombras ou a imagens obtidas por sensores cuja sensibilidade varie ponto-a-ponto. Se a iluminação fôr descrita por uma função da posição na imagem que seja conhecida, pode-se corrigi-la através de técnicas de correção da escala de cinza. Em seguida, a limiarização pode ser capaz de segmentar toda a imagem (ROSENFELD & KAK, 1982b). Quando a função que descreve a iluminação não fôr conhecida, deve-se aplicar limiarização local a diversos subconjuntos da imagem, de forma a se obter regiões mais homogêneas.

Outra situação onde a limiarização local pode ser útil ocorre quando os objetos a serem extraídos são muito pequenos e esparsos, de forma que o fundo é preponderante na imagem e os objetos não produzem picos detectáveis no histograma. Esse problema pode ser contornado obtendo-se histogramas de pequenos subconjuntos da imagem, sendo que os histogramas dos subconjuntos contendo objetos serão bimodais. Desta forma, os limiares podem ser escolhidos e interpolados para o resto da imagem.

Em lugar de se procurar subconjuntos com histogramas bimodais e utilizá-los para definir limiares locais, pode-se escolher subconjuntos que apresentam baixa variabilidade e utilizar seus tons de cinza médios como centros de aglomerados. Os *pixels* são classificados em função de suas distâncias a esses centros. Essa técnica é bastante apropriada em imagens compostas por vários tipos de regiões.

Suavização e limiarização. Freqüentemente, as subpopulações de níveis de cinza, correspondentes aos diferentes tipos de regiões presentes em uma imagem, encontram-se sobrepostas. Nessas condições, a segmentação da imagem através da limiarização torna-se difícil, uma vez que é impossível separar regiões sobrepostas aplicando-se simplesmente um limiar. Uma forma de contornar esse problema consiste na suavização da imagem antes de limiarizá-la (ROSENFELD & KAK, 1982b). Além disso,

pode-se suavizar ou filtrar uma imagem através da remoção do ruído presente, de forma que o subconjunto obtido por limiarização contenha o mínimo de *pixels* com ruído. Uma desvantagem desse método é que a suavização pela média, p. ex., não preserva os detalhes das formas das regiões, tendendo a suavizar as irregularidades das bordas entre regiões. Se uma imagem é suavizada através de filtragem da média e o valor de limiar escolhido fôr muito alto (ou muito baixo), é possível extrair a área escura (ou a área clara) como um subconjunto dessa imagem (ROSENFELD, 1969).

Aguçamento e limiarização. O operador de aguçamento a ser aplicado pode ser do tipo que produz um valor alto nas bordas e baixo no resto da imagem. A limiarização produz subconjuntos com a forma de pontos ou de linhas. O método misto pode ser usado para extrair subconjuntos que não possuem uma faixa preestabelecida de níveis de cinza, mas que contrastam com sua vizinhança, produzindo-se contornos de tais subconjuntos. Não há, entretanto, garantia que tais contornos sejam curvas fechadas (ROSENFELD, 1969).

Seleção do limiar. O problema fundamental no uso de métodos de segmentação baseados em limiarização é a escolha do valor de limiar. Algumas vezes, é possível selecionar um bom limiar para cada imagem f de forma automática, através do exame da distribuição dos níveis de cinza na imagem. A seguir, encontram-se alguns comentários sobre o processo de escolha do limiar (JAIN, 1989):

(a) Exame do histograma para localização de picos e vales. Se o histograma fôr multimodal, os vales podem ser usados para seleção de limiares;

(b) A seleção do limiar t deve ser feita de forma que uma fração predeterminada η do número total de amostras fica abaixo de t;

(c) O limiar pode ser adaptativo, através de um exame dos histogramas das vizinhanças locais;

(d) O limiar pode ser seletivo, através do exame do histograma somente dos pontos que satisfazem a um determinado critério;

(e) Se o método probabilístico das diferentes classes de segmentação fôr conhecido, o limiar deve ser determinado de forma a minimizar a probabilidade de erro.

Um limiar que separe os picos de um histograma bimodal pode ser escolhido automaticamente pelo seguinte método (ROSENFELD & KAK, 1982b):

(a) Seja o histograma $p(z)$;

(b) Encontram-se os dois máximos locais, z_i e z_j, separados por uma dada distância mínima;

(c) Encontra-se o ponto entre z_i e z_j onde $p(z)$ possua o valor mínimo, z_k;

(d) Se $p(z_k)/min(p(z_i), p(z_j)) < 0,1$, o histograma apresenta um vale significativo entre os picos e z_k pode ser considerado um bom limiar para segmentar a imagem.

Usar o menor valor entre os picos como limiar é intuitivamente razoável, mas se as densidades de probabilidade das duas subpopulações forem conhecidas, pode-se concluir que esse limiar não corresponde ao valor ótimo.

Uma variação da representação dos resultados da limiarização consiste em atribuir o valor máximo para os *pixels* mais claros que o limiar e manter os *pixels* mais escuros que o limiar com seus tons de cinza originais. Esse processo é conhecido como *semilimiarização*.

Segmentação baseada na forma. Os métodos de segmentação baseados em limiarização produzem contornos cujas fronteiras são irregulares e confusas. Os métodos de contração e expansão podem ser usados para detectar ou mesmo eliminar essas pequenas irregularidades, sendo assim uma técnica de suavização da forma. Um defeito convexo pode ser removido pela contração seguida da expansão do objeto. Um defeito côncavo, por sua vez, pode ser removido por uma expansão seguida de uma contração. Para isolar os defeitos, as imagens resultantes podem ser subtraídas da imagem original (NIBLACK, 1986).

3.6.4 Comparação entre imagens

Um problema muito comum na análise de imagens é a detecção de alterações ou da presença de um objeto em uma dada imagem. Tais problemas ocorrem em sensoriamento remoto para monitoração do crescimento de áreas urbanas, previsão climática a partir de imagens de satélites, diagnósticos de doenças a partir de imagens médicas, detecção de defeitos em ensaios radiográficos, detecção de objetos e automação usando visão computacional (JAIN, 1989).

Subtração de imagens. Em muitas aplicações de *imageamento*, é desejável comparar duas imagens. Um método simples e bastante poderoso de se fazer isso consiste em alinhar as duas imagens e subtraí-las, aplicando-se técnicas de realce à imagem resultante. Essa técnica permite, por exemplo, a detecção de componentes ausentes ou mal posicionados em uma determinada montagem (JAIN, 1989). Alterações em imagens dinâmicas, observadas como $u_i(x, y)$, $i = 1, 2, \ldots$ são dadas por

$$v_i(x,y) = u_i(x,y) - u_{i-1}(x,y). \tag{42}$$

3.7 Conclusões

Neste capítulo, procurou-se abordar as principais técnicas de processamento digital de imagens existentes, tendo sido focalizado desde a aquisição de imagens até a análise das mesmas, passando pela representação, modelamento, realce e restauração de imagens. Essas técnicas foram apresentadas sob a ótica do sistema desenvolvido nesta dissertação, ou seja, foram enfatizadas aquelas técnicas de PDI que mais se adequam à aquisição e à análise de imagens radiográficas e, em particular, de imagens radiográficas com nêutrons.

A aplicação de técnicas de PDI a imagens radiográficas permite a revelação de detalhes invisíveis em imagens diretas, tais como orifícios, através da inversão da imagem; defeitos em detectores, através da integração de imagens e percepção de ligeiras diferenças de contraste entre imagens de baixo contraste, através da 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. A extração de contornos é particularmente efetiva quando aplicada para se observar objetos em movimento. A operação de média de quadros aproveita o caráter aleatório do ruído presente na radiografia para aumentar a relação sinal/ruído da mesma: vários quadros 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 passa-altas e passa-baixas em uma imagem (DIAS & ARAÚJO, 1993a, b, c, 1994a).

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA NEUTRA

Um sistema de análise de radiografias deve ser uma ferramenta de diagnóstico capaz de fornecer ao radiologista informações tanto quantitativas, quanto qualitativas sobre itens presentes nas radiografias.

C.A. Harlow

O realce óptico e digital de imagens tem sido estudado e empregado desde o início da década de 60. Esses primeiros trabalhos em realce de imagens, tanto óptico quanto digital concentraram-se em filtragem passa-altas, passa-baixas e passa-bandas no domínio da freqüência. Na verdade, devido à falta de um modelo adequado para a formação de imagens radiográficas e devido aos limitados recursos computacionais disponíveis, foi razoável limitar a aplicação do processamento de imagens aos métodos supra-citados. À medida que os computadores foram se tornando mais poderosos, a aplicação de técnicas de PDI a imagens radiográficas foi se tornando mais prática, crescendo continuamente nos últimos anos. O maior problema que ainda restringe a aplicação de técnicas de restauração de imagens é a falta de modelos de formação de imagens que possam ser manipulados matematicamente. Devido a essa dificuldade de se encontrar um modelo apropriado, o estado-da-arte em processamento de imagens radiográficas tem se limitado à aplicação de técnicas de realce, com modestas incursões em restauração.

Há uma grande motivação para se empregar a filtragem passa-altas no realce de imagens radiográficas, pois os pequenos detalhes e as bordas, que normalmente se pretende realçar, são fenômenos caracteristicamente de alta freqüência, enquanto os componentes de baixa freqüência presentes no sinal são responsáveis pelo sombreamento da imagem. Devido à larga faixa dinâmica do filme radiográfico, essa informação de baixa freqüência mascara os detalhes que se pretende investigar. A atenuação das baixas freqüências presentes na imagem pela ação da filtragem passa-altas resulta em uma redução acentuada da faixa dinâmica da imagem. Assim, para explorar toda a faixa dinâmica do dispositivo de visualização, a imagem deve ter sua faixa dinâmica expandida. Dentre as diversas técnicas empregadas para a expansão da faixa dinâmica dessas imagens, pode-se citar a equalização histogrâmica (TRUSSEL, 1981).

Neste capítulo, descreve-se o sistema NEUTRA, abordando tanto as instalações radiográficas utilizadas para produzir as imagens com nêutrons - os reatores IPR-R1 e Argonauta, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), respectivamente, quanto os aspectos do *imageamento* com nêutrons utilizando filmes radiográficos e da digitalização das imagens. Além disso, é descrito o analisador de imagens radiográficas, em termos das plataformas de *hardware* e de *software* necessárias para a sua utilização e das funções de PDI nele implementadas.

4.1 Instalação radiográfica

O sistema NEUTRA foi desenvolvido com a finalidade de atender às instalações radiográficas com nêutrons existentes em dois centros de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN): o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte, MG, e o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, RJ, que possuem os reatores nucleares IPR-R1 e Argonauta, respectivamente. Em ambas as instalações, esses reatores nucleares foram utilizados como fontes de nêutrons, tendo sido desenvolvidos dispositivos extratores de nêutrons para esses reatores, com a finalidade de produzir feixes colimados e monocromáticos de nêutrons.

4.1.1 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*, EUA, que se encontra em operação desde 1960.

O reator IPR-R1 comporta-se como uma fonte de nêutrons distribuída, como aquela representada na FIG. 1, dispondo de um tubo vertical que atua como um dispositivo extrator de nêutrons com baixa contaminação inerente, semelhante àquele representado pela FIG. 2. Esse extrator exerce também a função de colimador do feixe de nêutrons, tornando disponível um feixe de nêutrons epitérmicos e térmicos ao longo do canal extrator.

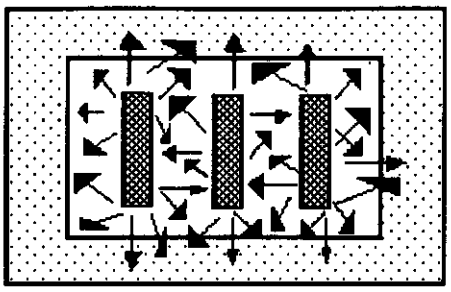


FIGURA 1 - Fonte de nêutrons distribuída usando reator nuclear.

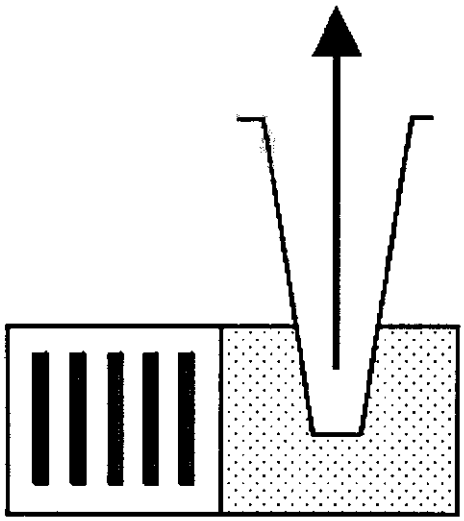


FIGURA 2 - Tubo extrator de nêutrons vertical (vista lateral).

O núcleo do reator IPR-R1, que se encontra instalado em uma piscina de cerca de 6 *m* 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 (TÓFANI & PAIANO, 1989), os quais são listados a seguir, com seus respectivos fluxos máximos de nêutrons térmicos à potência de 100 *kW*: (a) tubo central ($4{,}3 \times 10^{12}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); (b) mesa giratória, que comporta até 40 amostras simultaneamente ($6{,}6 \times 10^{11}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); (c) terminal pneumático no núcleo ($1{,}7 \times 10^{12}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); (d) terminal pneumático fora do núcleo ($1{,}8 \times 10^{11}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) e (e) extrator de nêutrons, para radiografia com nêutrons, colocado sobre o núcleo ($2{,}0 \times 10^{8}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$).

O canal extrator de nêutrons do reator IPR-R1, representado nas FIG. 3 e 4, 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. O extrator de nêutrons consiste basicamente em um tubo vertical de alumínio, estanque à água, com seções de 10 *cm* e 15 *cm* de diâmetro, fechado em sua extremidade inferior (AMORIM, 1987a). Essa extremidade é colocada imediatamente acima do anel refletor de grafita e a extremidade oposta, aberta, é utilizada para introdução dos objetos a serem radiografados. O extrator de nêutrons pode ser colocado e retirado da posição de operação, sobre o núcleo do reator, através de trilhos especialmente instalados para esse fim, como pode ser observado na FIG. 4.

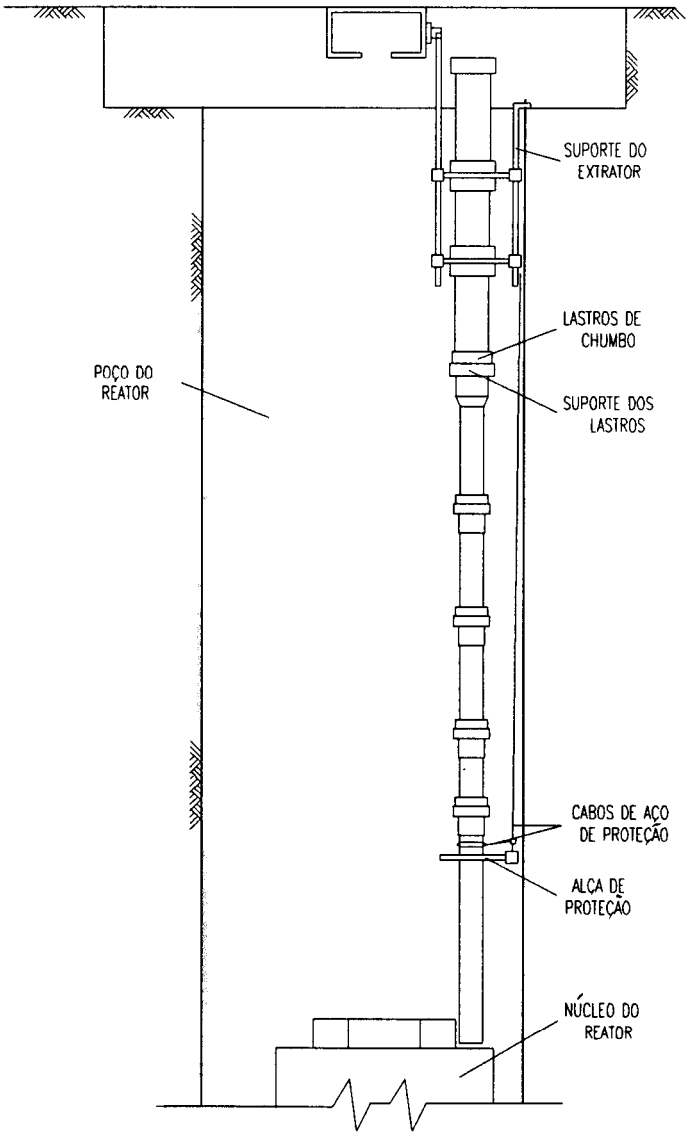


FIGURA 3 - Vista lateral do dispositivo extrator de nêutrons do reator IPR-R1
FONTE: AMORIM, 1987a, p. 8.

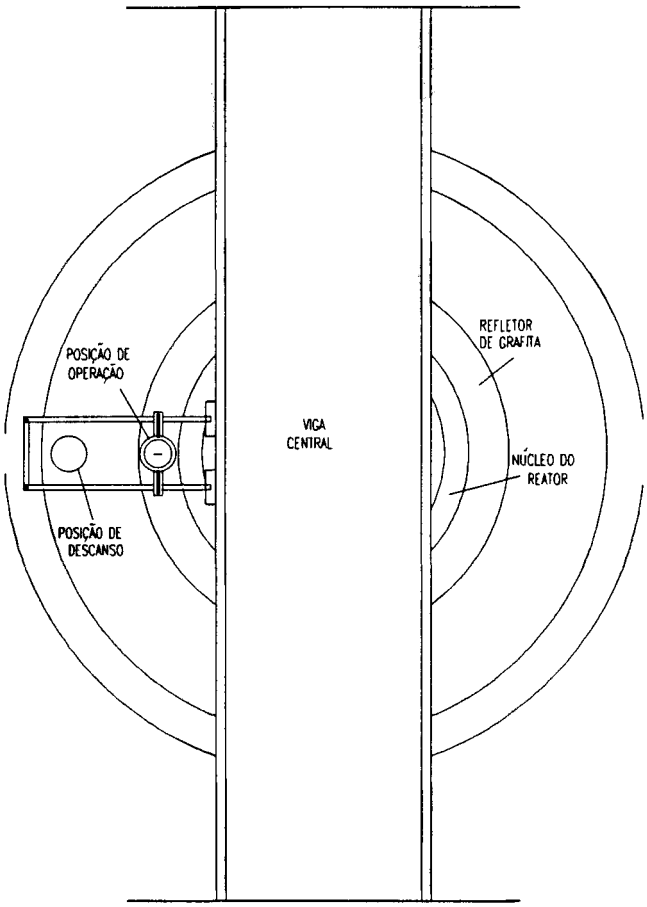


FIGURA 4 - Vista superior do dispositivo extrator de nêutrons do reator IPR-R1
FONTE: AMORIM, 1987a, p. 9.

O tempo de exposição a que foram submetidos os objetos, durante os testes do canal extrator de nêutrons, não ultrapassou cinco minutos, a um fluxo de nêutrons térmicos de aproximadamente $1{,}68 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ e a uma distância de cerca 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, 1987b). Na TAB. 1, encontram-se relacionadas as principais características da instalação radiográfica com nêutrons do reator IPR-R1.

4.1.2 Reator Argonauta

O reator Argonauta, semelhantemente ao reator IPR-R1, comporta-se como uma fonte de nêutrons distribuída, como aquela representada na FIG. 1, sendo um reator de pesquisa, refrigerado por convecção natural ou forçada da própria água leve empregada para moderação. O Argonauta utiliza urânio enriquecido a 19,91% em ^{235}U,

na forma de óxido de urânio (U_3O_8), como combustível nuclear. A potência máxima na configuração de uma lâmina (seis elementos combustíveis) é de 5 *kW*, sendo que, para aplicações em pesquisa e treinamento, é usual operá-lo a 200 *W*. No núcleo, os fluxos máximos teóricos de nêutrons térmicos e rápidos são de $4{,}4 \times 10^9\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ e $8{,}9 \times 10^9\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, respectivamente.

TABELA 1

Características da instalação de radiografia com nêutrons do reator IPR-R1

PARÂMETRO	VALOR
Potência do reator (*kW*)	100
ϕ_{ter} no núcleo ($cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	$2{,}0 \times 10^8$
Razão L/D	(1) 24 (2) 24 (3) 35
Faixa de L (*cm*)	(1) 240 (2) 362 (3) 525
ϕ_{ter} no filme ($cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	(1) $5{,}23 \times 10^6$ (2) $1{,}68 \times 10^6$ (3) ...
Taxa de dose γ (*R/h*)	(1) 0,17 (2) 0,03 (3) ...
Dimensões do filme (*mm*)	(1) 95 (2) 145 (3) 145
Razão n/γ ($cm^{-2} \cdot mR^{-1}$)	(1) $3{,}08 \times 10^4$ (2) $5{,}60 \times 10^4$ (3) ...
Razão de cádmio	(1) 28,4 (2) 26,6 (3) ...

FONTE - AMORIM, 1987b, p. 11
NOTA - Altura com relação ao núcleo do reator: (1) 240 *cm*; (2) 362 *cm*; (3) 525 *cm*

O dispositivo radiográfico com nêutrons do reator Argonauta encontra-se instalado na coluna térmica externa, que está situada na parte frontal do reator e é constituída de uma pilha de grafita. O canal de irradiação J-9 da coluna térmica externa está situado a meia-altura dos elementos combustíveis e dispõe de um fluxo de nêutrons térmicos de $7{,}91 \times 10^8\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ na entrada do canal, com razão de cádmio de 2,3 à potência de 170 *W*. O valor do fluxo de nêutrons térmicos, medido no centro do combustível, é de $1{,}14 \times 10^9\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. Como pode ser observado na FIG. 5, ao sair do núcleo, o feixe de nêutrons térmicos atravessa o canal de irradiação J-9, onde há dois colimadores de grafita. No plano da imagem, para o reator operando a 170 *W*, o fluxo medido de nêutrons térmicos é de $2{,}0 \times 10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, para uma razão de colimação L/D de 102, uma razão n/γ de $5{,}4 \times 10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$, e uma razão de cádmio igual a 20 (CRISPIM, 1993).

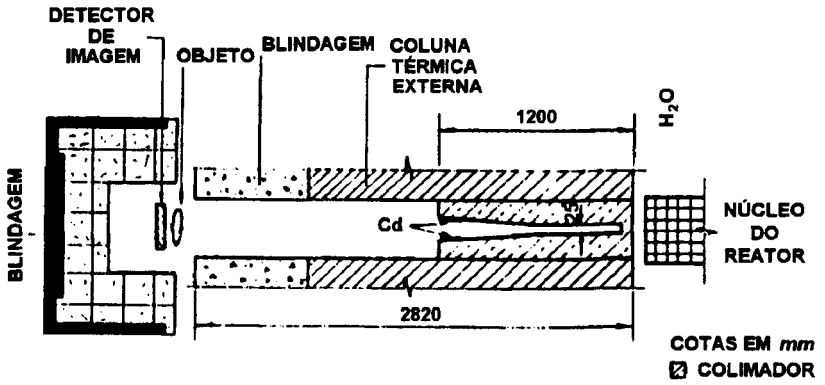


FIGURA 5 - Sistema colimador instalado no canal J-9 do reator Argonauta.
FONTE: CRISPIM, 1993, p.84.

4.1.3 *Imageamento* com nêutrons

No reator IPR-R1, tem sido utilizado o *imageamento* por exposição direta, descrito no ANEXO A, empregando-se uma tela metálica de gadolínio como conversor posterior. Para se obter as radiografias com nêutrons térmicos nessa instalação, um filme *Kodak*, tipo AA-5, é colocado em contacto direto com a tela de gadolínio, de 100 *μm* de espessura, no interior de um cassete vedado à luz, construído em alumínio. Esse cassete, por sua vez, é justaposto ao objeto a ser inspecionado e o conjunto cassete-objeto é inserido dentro do canal extrator, para ser exposto ao feixe de nêutrons.

Algumas deficiências intrínsecas à instalação radiográfica do reator IPR-R1 e do material utilizado nos experimentos impõem limitações à qualidade das radiografias obtidas, conforme é apresentado a seguir:

(a) Presença de radiação γ no plano da imagem, o que causa uma redução do contraste da radiografia, devido à formação de uma imagem de ruído sobreposta à imagem obtida com nêutrons. A colocação de um filtro de chumbo de 6 *cm* de espessura no interior do canal extrator reduz significativamente a intensidade da radiação γ incidente sobre o filme (AMORIM, 1987a), melhorando a discriminação de radiação γ do sistema, mas reduz também a intensidade do fluxo de nêutrons térmicos no canal. Essa redução no fluxo de nêutrons implica na diminuição do contraste das radiografias produzidas e na diminuição da rapidez do processo de registro, tornando compulsório o aumento do tempo de exposição do filme;

(b) Espessura do conversor de gadolínio. A tela de gadolínio utilizada é de 100 μm de espessura, enquanto que a espessura típica das telas empregadas em *imageamento* por exposição direta é de 25 μm, conforme pode ser observado na TAB. 17, do ANEXO A. Esse fator é responsável por uma diminuição da resolução, do contraste e da eficiência do sistema radiográfico;

(c) Baixo fator de colimação. O fator de colimação, ou razão L/D, da instalação radiográfica do reator IPR-R1 é igual a 35, no melhor caso (ao nível do piso), sendo que nos testes até então realizados esse valor foi igual a 24, quando o valor recomendado na literatura para se obter radiografias com boa resolução é igual a 100;

(d) Baixo fluxo de nêutrons térmicos no plano da imagem. O valor recomendado para se obter radiografias de bom contraste é de $3{,}9 \times 10^9$ $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, utilizando-se filmes lentos, e de 10^8 $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, utilizando-se filmes rápidos, enquanto que o fluxo disponível no plano da imagem é de apenas $1{,}68 \times 10^6$ $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$.

Todos esses fatores reforçam e justificam a necessidade da utilização de um sistema de PDI para realçar e restaurar as imagens radiográficas produzidas no reator IPR-R1.

4.1.4 Digitalização das radiografias

Dentre os principais dispositivos empregados para digitalização de imagens que foram relacionados no cap. 3, item 3.2, aqueles que são mais largamente utilizados

para digitalizar imagens radiográficas são os microdensitômetros e os digitalizadores (*scanners*) de mesa.

Para a realização deste trabalho, utilizou-se um digitalizador de mesa *Hewlett-Packard*, modelo *ScanJet IIp*, do tipo reflexivo, de 300 *dpi* e 256 níveis de cinza. Esse equipamento apresenta um bom desempenho na digitalização de positivos de radiografias, mas é incapaz de registrar a densidade óptica de negativos radiográficos. Para a digitalização desses negativos deve-se dispor de um digitalizador de mesa de emissão direta (não-reflexivo). Assim, quando os positivos das radiografias estavam disponíveis, a digitalização dos mesmos foi realizada sem problemas.

Entretanto, algumas radiografias produzidas no reator Argonauta somente estavam disponíveis na forma de negativos. Esses negativos foram digitalizados utilizando-se o equipamento supra-citado numa configuração especial (FIG. 6): a tampa superior do digitalizador foi removida, o negativo foi fixado sobre a superfície de digitalização e providenciou-se uma fonte de luz suficientemente intensa, difusa e homogênea para iluminar o plano da imagem, superando a densidade óptica do negativo e possibilitando a captura da imagem pelo digitalizador.

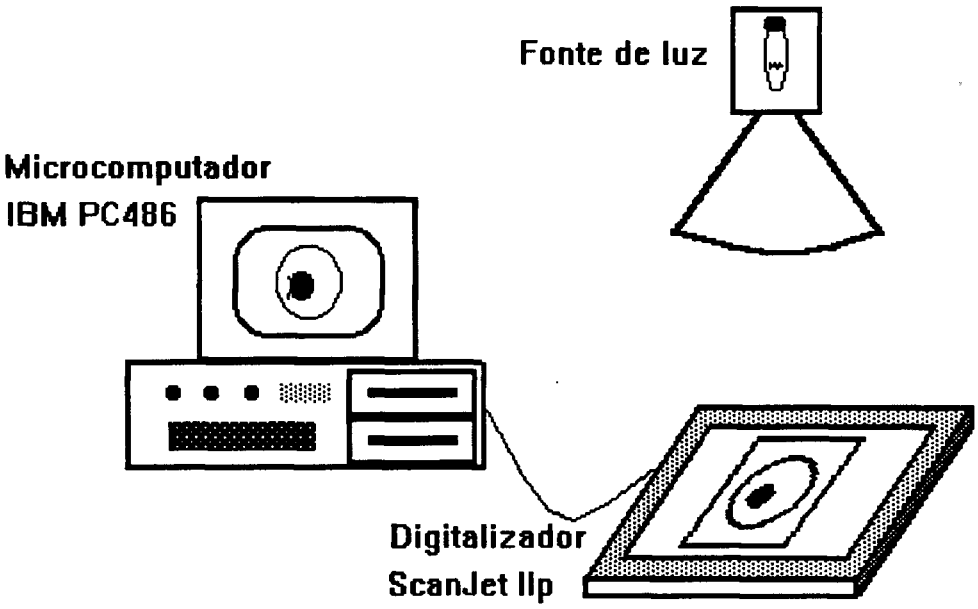


FIGURA 6 - Digitalização de negativos usando o *ScanJet IIp*.

Esse método de digitalização apresentou resultados bastante satisfatórios, mas apesar do esforço em se providenciar uma fonte de luz homogênea, não se obteve

uma iluminação uniforme da superfície do digitalizador, implicando no surgimento de gradientes de iluminação ao longo da imagem resultante e na existência de áreas de baixo contraste. Por outro lado, a digitalização de positivos de radiografias não é recomendável, uma vez que o processo de cópia de negativos para papel fotográfico introduz degradações adicionais nas imagens, além daquelas inerentes ao processo fotográfico em si (sensibilização da emulsão e revelação do filme).

Alternativamente, imagens registradas em negativos radiográficos, ocupando uma região quadrada de aproximadamente 10 *cm* de lado, foram digitalizadas empregando-se uma câmara de vídeo CCD, uma placa digitalizadora (*frame-grabber*) e um iluminador radiográfico, conforme é representado na FIG. 7. Um monitor de vídeo é utilizado para auxiliar na focalização das imagens, uma vez que o *frame-grabber* empregado não é capaz de apresentar as imagens no monitor do computador à mesma taxa em que elas são capturadas. Os resultados obtidos por meio dessa técnica de digitalização foram superiores àqueles obtidos por meio da montagem representada pela FIG. 6, pois obteve-se um padrão de iluminação praticamente uniforme.

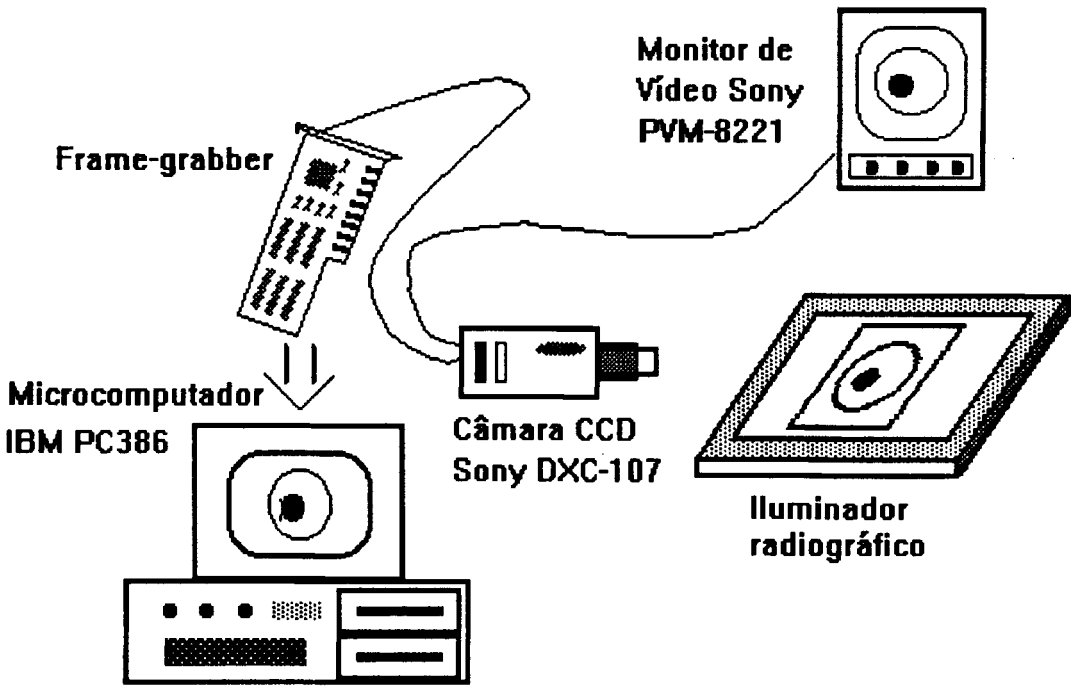


FIGURA 7 - Digitalização de negativos usando câmara de vídeo.

4.2 Analisador de imagens

O analisador de imagens que integra o sistema NEUTRA foi desenvolvido com o objetivo de ilustrar a potencialidade da aplicação de PDI a imagens radiográficas com nêutrons, quando se deseja realçar detalhes presentes nas imagens, restaurar degradações sofridas durante a aquisição das imagens, segmentar regiões das imagens, realizar medições dimensionais sobre áreas das imagens etc. Procurou-se desenvolver uma ferramenta dedicada, versátil e abrangente, capaz de auxiliar o especialista em radiografia com nêutrons na visualização e na análise de resultados de ensaios radiográficos. Para isso, optou-se pela plataforma IBM PC, baseada nos microprocessadores *Intel* 80x86, e pela interface *PixelWare* (DAVIS JR., 1992) (DAVIS JR. & ARAÚJO, 1992a), desenvolvida no Departamento de Ciência da Computação (DCC) da UFMG.

4.2.1 Plataforma de desenvolvimento

Para executar as funções implementadas no analisador de imagens, é necessário que se disponha, no mínimo, de um equipamento com a seguinte configuração (DAVIS JR., 1992):

- *Central Processor Unit* (CPU) baseada nos microprocessadores da família 80x86;
- 640 *kbytes* de memória *Random Access Memory* (RAM);
- Monitor de vídeo e placa gráfica padrão *Super Video Graphics Adaptor* (SVGA) com 512 *kbytes* de RAM, baseada em um dos seguintes *chip sets*: *Ahead*, *ATI*, *Chips & Technologies*, *Everex*, *Paradise*, *Trident* e *Video Seven*. É possível, ainda, o emprego de placas gráficas compatíveis com o padrão *Video Electronics Standards Association* (VESA);
- *Mouse* compatível com o *Microsoft Mouse*;
- Unidade de disco rígido;
- Coprocessador aritmético. Recomenda-se o emprego do coprocessador, pois a presença do mesmo acelera significativamente a execução das operações em ponto flutuante.

Naturalmente, o desempenho do analisador pode ser consideravelmente melhorado caso se disponha de uma CPU rápida, de uma unidade de disco rígido com o menor tempo de acesso possível e de uma grande quantidade de memória RAM.

O analisador de imagens, cuja tela de apresentação é mostrada na FIG. 8, foi implementado a partir do sistema *PixelWare*, um sistema de processamento digital de imagens modular, expansível e amigável, baseado em uma interface gráfica com o usuário (DAVIS, 1992). O *PixelWare* foi concebido para utilizar apenas os 640 *kbytes* de memória gerenciados pelo sistema operacional *Disk Operating System* (DOS), sendo que as imagens por ele processadas são mantidas permanentemente em disco e as funções de PDI operam sobre pequenas porções das mesmas. Assim, a única limitação quanto ao tamanho das imagens processadas deve-se ao espaço de armazenamento disponível em disco.

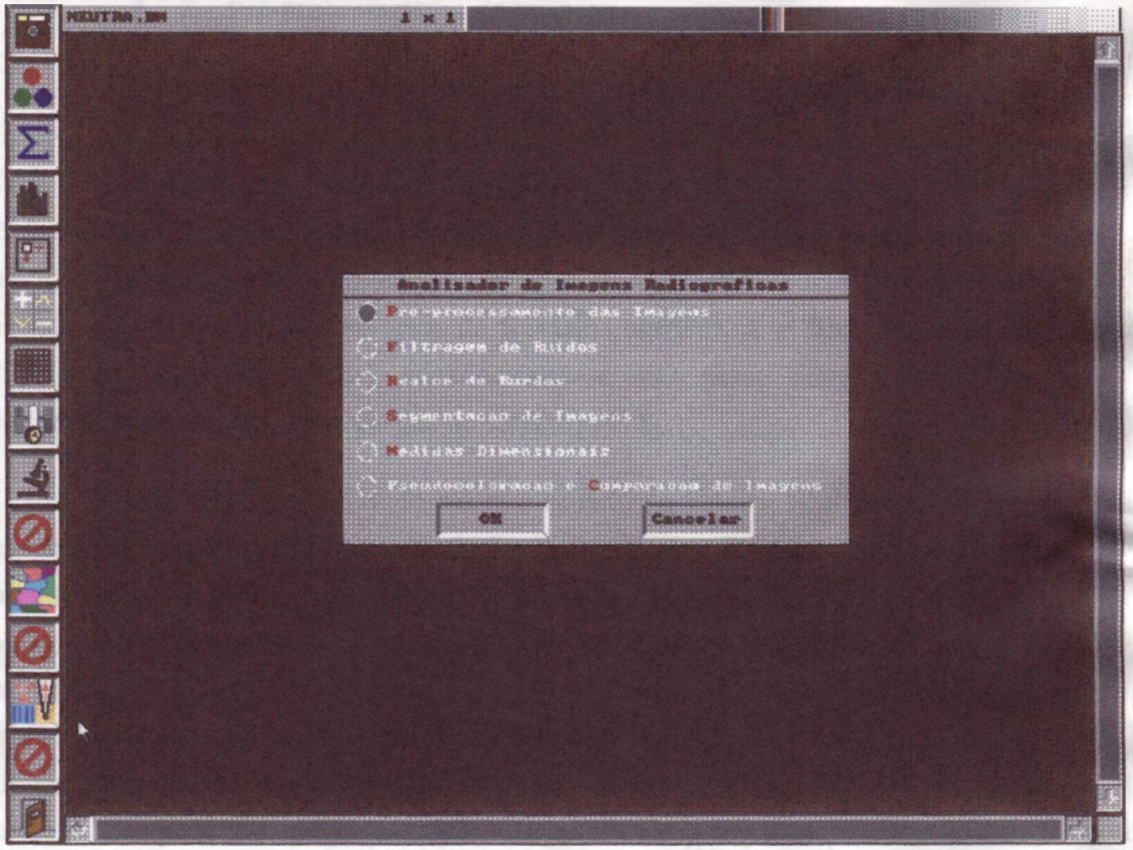


FIGURA 8 - Tela de apresentação do analisador de imagens.

Há duas maneiras de se otimizar o acesso às imagens no sistema *PixelWare*: (a) a configuração de parte da memória estendida como disco virtual (*RAMdisk*) ou (b) a utilização de programas de *caché* de disco (SMARTDRIVE, p. ex.). Essa última opção é a mais recomendada, pois o tamanho das imagens continua sendo limitado pelo espaço disponível em disco rígido e não pela área de memória RAM reservada para o disco virtual (ANDRADE, 1993).

O sistema *PixelWare* opera sobre imagens no formato BM (*BitMap*), descrito por DAVIS (1992), que é um formato não-compactado, o que simplifica o processamento por não exigir da CPU a compressão e a descompressão dos arquivos a cada acesso aos mesmos. Além disso, sua definição facilita a representação da estrutura bidimensional correspondente às imagens. Para facilitar o intercâmbio entre o *PixelWare* e outros aplicativos de PDI (como o programa de captura de imagens por meio do digitalizador), foram desenvolvidos programas conversores de formato (DAVIS & ARAÚJO, 1992b).

4.2.2 Pré-processamento de imagens

Os *softwares* que acompanham o digitalizador de imagens *ScanJet IIp* e o *frame-grabber* são capazes de produzir imagens de diversos formatos, como PCX, TIFF, BMP etc., enquanto que a interface *PixelWare* é capaz de operar apenas sobre imagens no formato BM. Desta forma, a primeira operação a ser aplicada sobre as imagens radiográficas deve ser a conversão das mesmas para o formato BM. Devido à disponibilidade de um programa conversor de formatos entre PCX e BM, desenvolvido por DAVIS & ARAÚJO (1992b), convencionou-se que, nesse sistema, as radiografias digitalizadas devem ser armazenadas no formato PCX.

Após a conversão de formato, o usuário do sistema NEUTRA deve corrigir as degradações sofridas pelas imagens em função de baixa intensidade e falta de uniformidade do feixe neutrônico, imperfeições do conversor, baixo tempo de exposição do filme radiográfico e deficiências na iluminação da superfície do digitalizador. Essas degradações afetam o brilho, o contraste e a resolução das imagens radiográficas, sendo que os efeitos sobre o brilho e o contraste podem ser minimizados ou mesmo suprimidos através da aplicação das seguintes operações, descritas no cap. 3: controle de brilho, correção do nível de cinza, expansão de contraste e equalização histogrâmica. O primeiro passo para a seleção e aplicação dessas funções consiste numa inspeção visual da imagem e do histograma da mesma, de forma a caracterizar o tipo de degradação preponderante na imagem.

A razão de aspecto dos *pixels* de imagens capturadas pela maioria dos *frame-grabbers* é 0,79, de forma que a imagem sofre uma deformação geométrica na direção vertical quando impressa ou visualizada em um monitor de vídeo. A operação de correção da razão de aspecto reduz a altura da imagem em 20 %, de forma a corrigir essa deformação. A imagem original de 480 × 512 *pixels* é transformada numa imagem

de 384 × 512 *pixels*, sendo que essa transformação consiste na supressão de uma linha da imagem a cada cinco linhas percorridas pelo algoritmo.

4.2.3 Filtragem de ruídos

O processo radiográfico com nêutrons sofre degradações causadas por três classes de ruídos: (a) ruídos inerentes ao método de *imageamento* fotográfico; (b) ruídos inerentes à técnica radiográfica e (c) ruídos produzidos durante o processo de digitalização das imagens.

O método de registro de imagens por exposição direta de filmes radiográficos sofre degradações devidas à granulação do filme, que podem ser restauradas por meio da técnica *noise cheating* (despistamento do ruído) ou por meio de filtragem espacial, escolhendo-se uma vizinhança adequada à dimensão dos grânulos da imagem.

Dois fatores característicos da técnica radiográfica com nêutrons acarretam o surgimento de degradações devidas à presença de radiação γ associada ao feixe neutrônico que forma uma imagem de ruído no filme sobreposta à imagem dos nêutrons e devidas ao espalhamento dos nêutrons ao atravessarem o objeto sob análise. Esse espalhamento causa acentuado borramento das bordas e manifesta-se sob a forma de ruído pontilhado, produzido pela interação dos nêutrons com as rugosidades do objeto. A redução do ruído de pontilhamento pode ser obtida por intermédio da aplicação de filtragem espacial ou do cálculo da média de múltiplas imagens, enquanto o borramento das bordas pode ser minimizado pela aplicação de funções de aguçamento de bordas (filtragem passa-altas). O ruído produzido pela radiação γ pode ser suprimido aplicando-se as operações de corte, limiarização e fatiamento de nível após a inspeção do histograma da imagem.

Por fim, os ruídos produzidos durante a digitalização das imagens devem-se a oscilações da fonte de luz que ilumina a superfície do digitalizador e ao critério de amostragem das imagens. Esses ruídos podem ser suprimidos na fase de pré-processamento ou através de filtragem espacial, respectivamente.

4.2.4 Realce de bordas

Como foi dito anteriormente, a técnica radiográfica com nêutrons produz imagens com baixa definição das bordas devido ao espalhamento que ocorre na interação dos nêutrons e dos núcleos atômicos. Desta forma, a aplicação de técnicas de realce de

bordas torna-se imprescindível quando o objetivo do processamento das imagens consiste na segmentação ou na realização de medidas dimensionais sobre as imagens. As técnicas de realce de bordas descritas no cap. 3 e incorporadas ao analisador de imagens são: *unsharp masking* (mascaramento não-agudo), diferenciação estatística, operadores gradiente e laplaciano, e métodos lineares de aguçamento de imagens (vertical, horizontal e diagonal).

4.2.5 Segmentação de imagens

Em imagens radiográficas, a segmentação das imagens é aplicada com o objetivo de particionar a imagem, extraindo do fundo da imagem os subconjuntos correspondentes aos objetos nela presentes. A técnica básica de segmentação consiste na limiarização da imagem, sendo que essa limiarização pode ser simples ou multinível e, na maioria das vezes, exige a aplicação de funções de suavização ou aguçamento antes de ser empregada, conforme é descrito no cap. 3.

4.2.6 Medidas dimensionais

A caracterização dos objetos presentes nas imagens radiográficas pode ser feita por meio da extração de seus atributos métricos, sendo que as medições dimensionais disponíveis no analisador são: perímetro, área, distância e redondeza.

A realização de medidas dimensionais sobre componentes de imagens é precedida pela execução de um algoritmo de segmentação descrito no pacote SPIDER (TAMURA *et al.*, 1983). Essa segmentação é realizada em quatro etapas: (a) cria-se uma matriz bidimensional nula, representando o estado inicial da imagem rotulada; (b) realiza-se uma rotulação parcial da imagem, sendo que o *pixel* central de uma máscara 3 × 3 é rotulado em concordância com o menor rótulo de parte de seus vizinhos, em função do grau de conectividade escolhido pelo usuário (4 ou 8); (c) corrigi-se inconsistências geradas na etapa anterior, atribuindo-se um único rótulo (sempre o menor possível) a cada região e; (d) re-rotula-se definitivamente o arquivo de rótulos, que é gravado em disco.

A determinação das áreas das regiões é realizada através de uma leitura seqüencial do arquivo de rótulos e da contagem dos rótulos correspondentes à região. Os perímetros são determinados a partir da imagem segmentada, sendo que o algoritmo realiza um *loop* sobre as linhas da imagem em busca de um rótulo que represente o

extremo superior de uma região. Para cada região encontrada, é extraído o seu perímetro. Uma máscara 3 × 3 centrada num *pixel* da borda permite que o próximo *pixel* da borda, situado mais à esquerda em relação à direção em que ocorreu o último movimento, seja determinado. A extração do perímetro é concluída quando o *pixel* inicial foi revisitado e não houver mais ramificações a serem percorridas.

Os algoritmos para realização dessas medidas foram extraídos do analisador de imagens dedicado à caracterização de materiais, para ser utilizado em ceramografia, desenvolvido por ANDRADE (1993) (ANDRADE *et al.*, 1992a) (ANDRADE *et al.*, 1992b).

4.2.7 Pseudocoloração e comparação de imagens

Duas outras funções estão disponíveis no analisador, uma para permitir uma melhor visualização das imagens processadas, a pseudocoloração, e outra para permitir a comparação entre duas imagens através da subtração das mesmas.

4.3 Conclusões

Neste capítulo, descreveu-se o sistema NEUTRA, detalhando-se os subsistemas empregados para produção das radiografias com nêutrons e para digitalização e análise das imagens radiográficas. Foram utilizadas radiografias com nêutrons produzidas em duas instalações radiográficas: o reator IPR-R1, do CDTN, e o reator Argonauta, do IEN, sendo que em ambas as instalações foi empregado o *imageamento* direto com filmes radiográficos e as radiografias resultantes foram digitalizadas por um digitalizador de mesa *ScanJet IIp*, da *Hewlett-Packard*, ou por uma câmara de vídeo CCD acoplada a uma placa digitalizadora (*frame-grabber*). O analisador de imagens foi implementado a partir da interface *PixelWare*, desenvolvida no DCC-UFMG, e pode ser utilizado em plataformas IBM-PC 80x86, equipadas com adaptadores gráficos SVGA. As funções de PDI incorporadas ao analisador foram agrupadas em seis classes: (a) pré-processamento de imagens; (b) filtragem de ruídos; (c) realce de bordas; (d) segmentação de imagens; (e) medidas dimensionais e; (f) pseudocoloração e comparação de imagens.

5 RESULTADOS OBTIDOS

É lindo destruir palavras. Naturalmente, o maior desperdício é nos verbos e adjetivos, mas há centenas de substantivos que podem ser perfeitamente eliminados. Não apenas os sinônimos; os antônimos também. Afinal de contas, que justificação existe para a existência de uma palavra que é apenas o contrário da outra? Cada palavra contém em si o contrário.

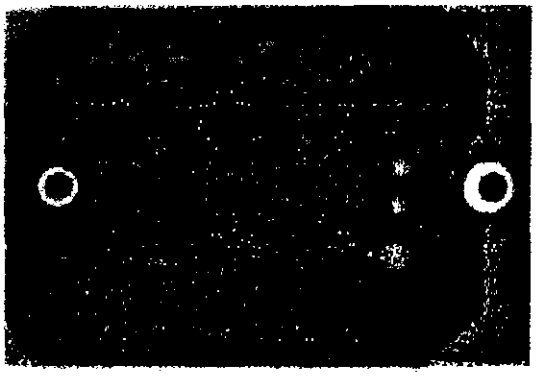
George Orwell

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos através das técnicas de aquisição e análise de imagens radiográficas com nêutrons descritas no cap. 4. Os resultados foram agrupados em função das três técnicas de digitalização de imagens empregadas: (a) digitalização de imagens positivas, registradas em papel fotográfico, capturadas por meio do digitalizador de mesa (*scanner*) *ScanJet IIp*; (b) digitalização de imagens negativas, registradas em filme radiográfico, por meio do digitalizador de mesa e; (c) digitalização de imagens negativas, registradas em filme radiográfico, por meio de uma câmara de vídeo CCD *Sony* DXC-107, acoplada a um *frame-grabber*. Além das imagens originais, são apresentadas as imagens processadas e os resultados numéricos obtidos pela aplicação das funções de PDI implementadas para o analisador de imagens, classificadas nas seguintes categorias: (a) pré-processamento de imagens; (b) filtragem de ruídos; (c) realce de bordas; (d) segmentação de imagens; (e) cálculo de medidas dimensionais e; (f) pseudocoloração e comparação de imagens.

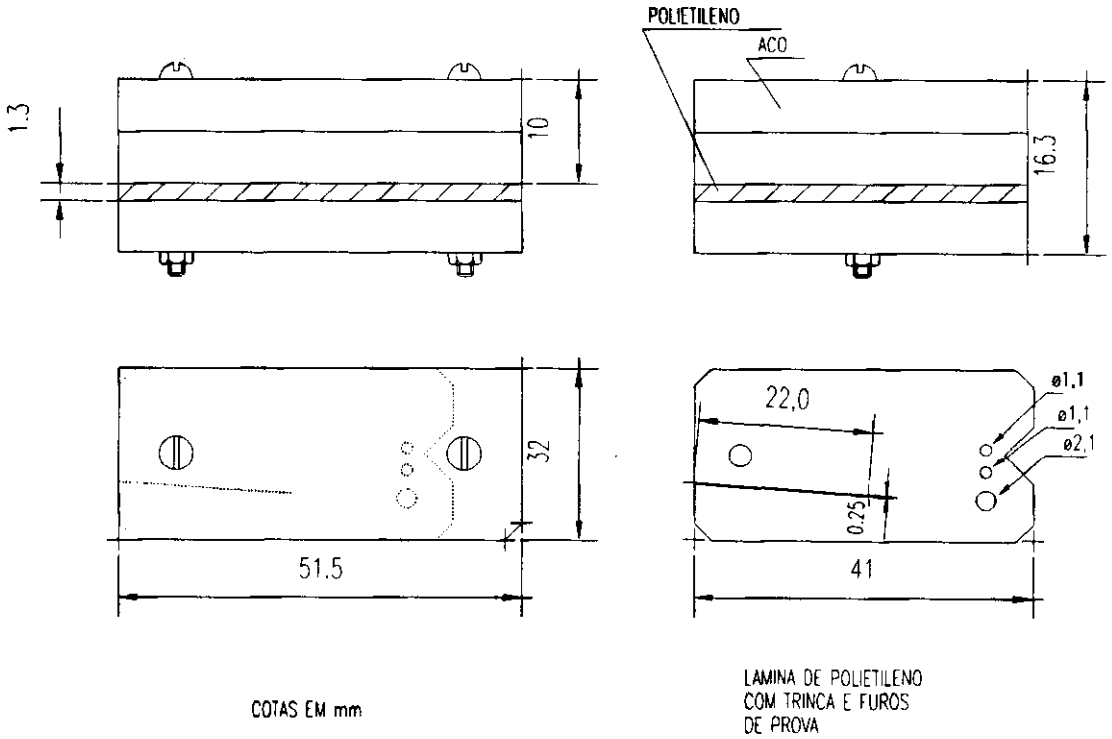
5.1 Imagens positivas, registradas em papel fotográfico, capturadas pelo *scanner*

As imagens apresentadas nas FIG. 9 a 18, a seguir, foram capturadas pelo digitalizador de mesa *ScanJet IIp*, a partir de imagens positivas, registradas em papel fotográfico, produzidas na instalação radiográfica com nêutrons do reator IPR-R1, por AMORIM (1987b).

Na FIG. 9(a), observa-se um Indicador de Resolução Visual (IRV) construído em aço e polietileno (a imagem sofreu uma expansão de contraste, a fim de realçar seus detalhes). Esse indicador consiste em uma lâmina de polietileno de 1,3 *mm* de espessura, com trinca de 0,25 *mm* de largura e 22 *mm* de extensão e três orifícios de 1,1; 1,1 e 2,1 *mm* de diâmetro, inserida entre duas lâminas de aço (com espessuras de 5 e 10 *mm*), como pode ser observado na FIG. 9(b). Nessa imagem, deseja-se realçar a trinca e os orifícios, bem como medir a extensão da trinca e a área dos orifícios.



(a)



(b)

FIGURA 9 - (a) Indicador de Resolução Visual em aço e polietileno; (b) Desenho do IRV. FONTE - AMORIM, 1987b. p.14.

A FIG. 10 mostra a imagem processada do IRV. As operações de PDI aplicadas foram: controle de brilho (b = 127), filtragem espacial SSDA (Suavização por Soma das Diferenças Absolutas), fatiamento de nível para realce dos orifícios e da trinca, corte para isolamento dos orifícios e da trinca, soma com a imagem original, suavização das bordas (filtro da mediana) e controle de brilho (b = 50).

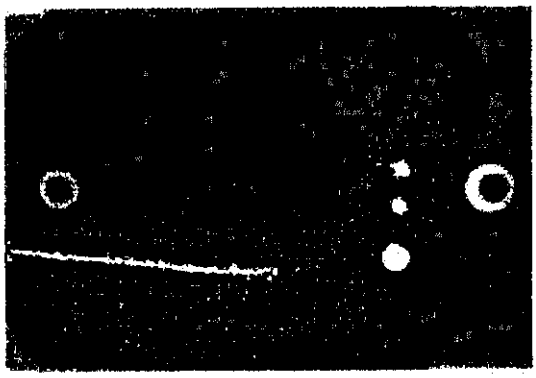


FIGURA 10 - IRV em aço e polietileno após processamento.

Na TAB. 2, encontram-se resumidos os resultados obtidos através da segmentação e da medição de áreas, perímetros e distâncias na imagem. Nessa tabela, as grandezas *automáticas* são calculadas pelo analisador após a segmentação, enquanto as grandezas *manuais* foram obtidas por meio da medição de distâncias sobre a imagem pelo operador. As medições automáticas apresentaram um desvio médio de 52,5 % dos valores reais, enquanto as medições manuais apresentaram um desvio médio de 4,92 %.

As imagens radiográficas com nêutrons não apresentam bordas bem definidas, devido ao espalhamento que ocorre na interação dos nêutrons e dos núcleos dos materiais, o que dificulta a segmentação dessas imagens. Observa-se que as dimensões da ordem de 1 *mm* ou inferiores apresentam maiores desvios entre as medições automáticas (ou mesmo manuais) e as medidas reais, devido à proximidade do limite da própria resolução espacial do dispositivo radiográfico.

As FIG. 11 e 12 mostram radiografias com nêutrons de materiais biológicos, tais como uma folha verde 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. Na FIG. 11, deseja-se realçar as nervuras da folha de hibisco, enquanto que na FIG. 12, deseja-se realçar as diferentes regiões presentes no tecido ósseo.

TABELA 2

Resultados da segmentação do IRV em aço e polietileno

MEDIDA (1)	Orifício 1 $\phi = 1,1$	Orifício 2 $\phi = 1,1$	Orifício 3 $\phi = 2,1$	Trinca 0,25 × 22
Perímetro real	3,45	3,45	6,60	-
Perímetro automático	7,45	6,10	11,51	-
Perímetro manual	3,67	3,83	7,02	-
Dimensão automática (2)	1,33	1,25	2,19	0,51 × 21,93
Dimensão manual (2)	1,06	1,28	2,04	0,25 × 22,11
Área real	0,95	0,95	3,46	-
Área automática	1,40	1,23	3,77	-

NOTA: (1) Todas as medidas estão em *mm*. (2) Diâmetro, para os orifícios e largura × comprimento, para a trinca.

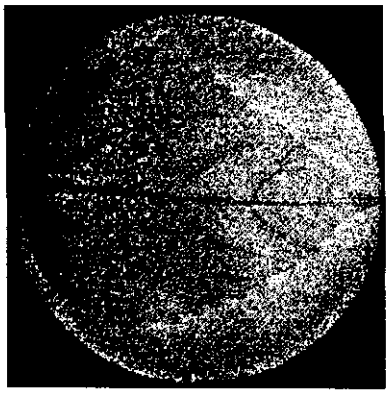


FIGURA 11 - Folha verde de hibisco.

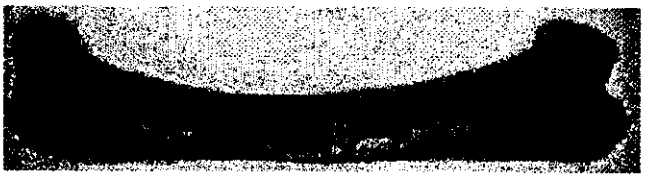


FIGURA 12 - Ante-coxa de galinha.

A FIG. 13 mostra a imagem processada da folha verde de hibisco. As operações de PDI aplicadas foram: controle de brilho variável, limiarização variável

(para compensar o gradiente de iluminação presente na imagem), fatiamento de nível para realce das nervuras, corte para isolamento das nervuras e soma com a imagem original.

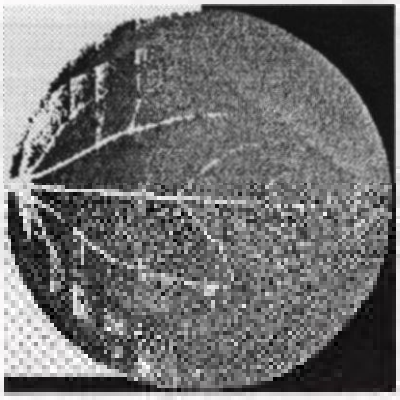


FIGURA 13 - Folha verde de hibisco após processamento.

A FIG. 14 mostra a imagem processada da ante-coxa de galinha. As operações de PDI aplicadas foram: subtração de fundo (através de fatiamento de nível), expansão de contraste e pseudocoloração (escala térmica).

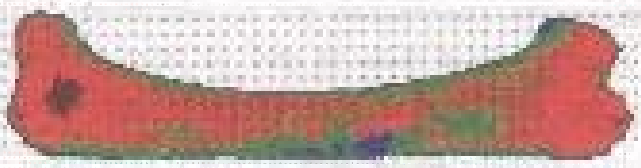


FIGURA 14 - Ante-coxa de galinha após processamento.

Na FIG. 15, é apresentada a radiografia de uma bala de revólver, calibre 38, onde se observa a presença do propelente, a pólvora, no interior da cápsula. Neste caso, deseja-se realçar a presença da pólvora, enfatizando-se os seus grânulos.

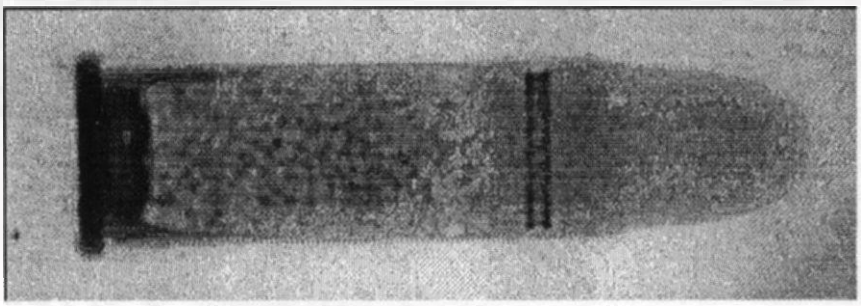


FIGURA 15 - Bala de revólver calibre 38.

A FIG. 16 mostra a imagem processada da bala de revólver. As operações de PDI aplicadas foram: subtração de fundo (através de limiarização variável), aguçamento (operador gradiente diagonal), expansão de contraste e equalização histogrâmica.

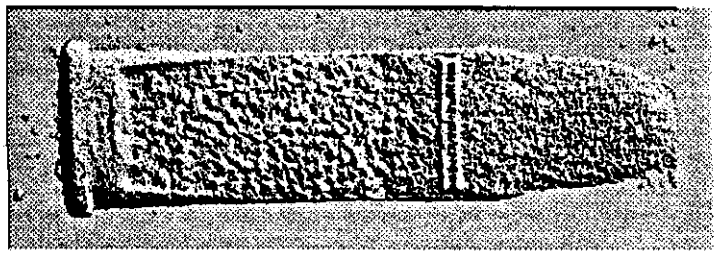
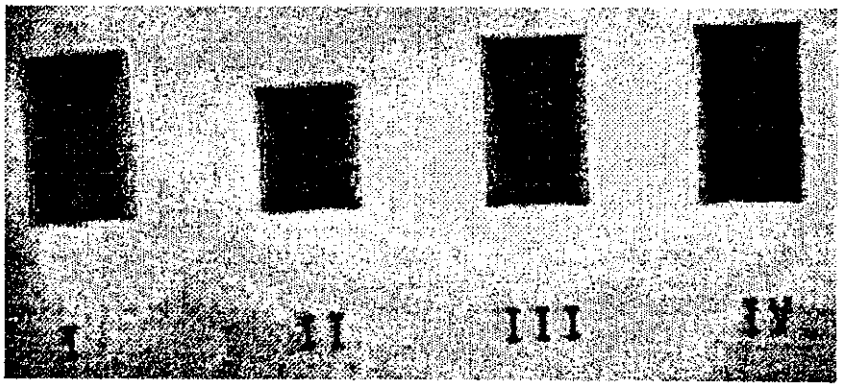


FIGURA 16 - Bala de revólver após processamento.

A FIG. 17 apresenta a radiografia de quatro pastilhas compactadas de óxido de urânio, diferentemente enriquecidas. O uso de PDI possibilita a detecção 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 diferenças entre nuclídeos. Desta forma, isótopos diferentes podem apresentar seções de choque muito diferentes e a radiografia com nêutrons pode revelar a distribuição de um determinado isótopo em uma amostra (WALKER, 1985), medida a partir do tom de cinza médio de cada amostra. Nesta imagem, deseja-se o cálculo da média e do desvio-padrão de cada uma das pastilhas, bem como o realce das mesmas através da pseudocoloração da imagem.



Pastilha I - Urânio natural
Pastilha II - Enriquecimento: 1,98% de ^{235}U
Pastilha III - Enriquecimento: 2,80% de ^{235}U
Pastilha IV - Enriquecimento: 3,40% de ^{235}U

FIGURA 17 - Pastilhas cilíndricas de óxido de urânio compactadas.

A FIG. 18 mostra a imagem processada das pastilhas de óxido de urânio. As operações de PDI aplicadas foram: subtração de fundo (através do fatiamento de nível), empobrecimento da escala (de 256 para 16 níveis de cinza) e pseudocoloração (escala térmica). Na TAB. 3, encontram-se os resultados dos cálculos da média e do desvio-padrão (DP) de cada uma das pastilhas, considerando-se tanto a imagem original quanto a imagem resultante do processamento. Pode-se observar que há uma grande superposição das faixas de níveis de cinza para as diferentes pastilhas. A caracterização de cada amostra pode ser traduzida pela probabilidade de possuir determinado grau de enriquecimento, sendo válida, todavia, apenas para análises comparativas entre amostras presentes numa mesma radiografia e submetidas a um feixe homogêneo de nêutrons. Essa restrição deve-se à influência de fatores como intensidade do feixe, tempo de exposição, tipo de filme radiográfico e parâmetros de revelação sobre o brilho, o contraste e a iluminação das imagens radiográficas. Essa influência dificulta, quando não inviabiliza, a caracterização de amostras em função de atributos histogrâmicos.

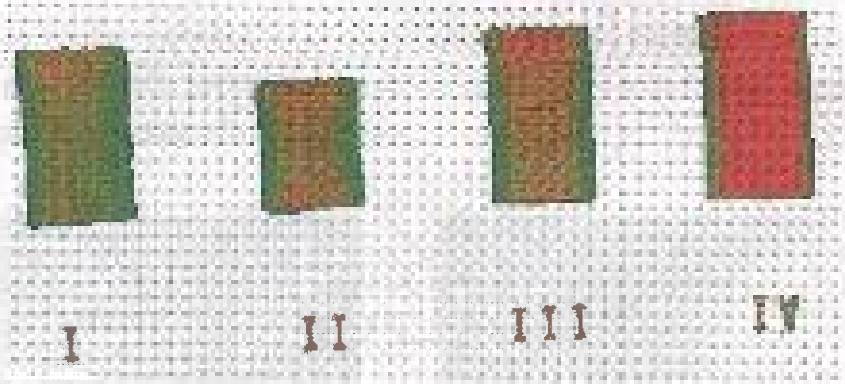


FIGURA 18 - Pastilhas de óxido de urânio após processamento.

5.2 Imagens negativas, registradas em filme, capturadas pelo *scanner*

As imagens apresentadas nas FIG. 19 a 30, a seguir, foram capturadas pelo digitalizador de mesa *ScanJet IIp*, a partir de imagens negativas, registradas em filme radiográfico, produzidas na instalação radiográfica com nêutrons do reator Argonauta, por CRISPIM (1993). Todas essas imagens estão acompanhadas da representação das condições de iluminação em que as mesmas foram digitalizadas. Nesse caso, torna-se necessário aplicar a operação de correção de iluminação, descrita no cap. 3, para pré-processar as imagens, antes de submetê-las às demais funções de PDI.

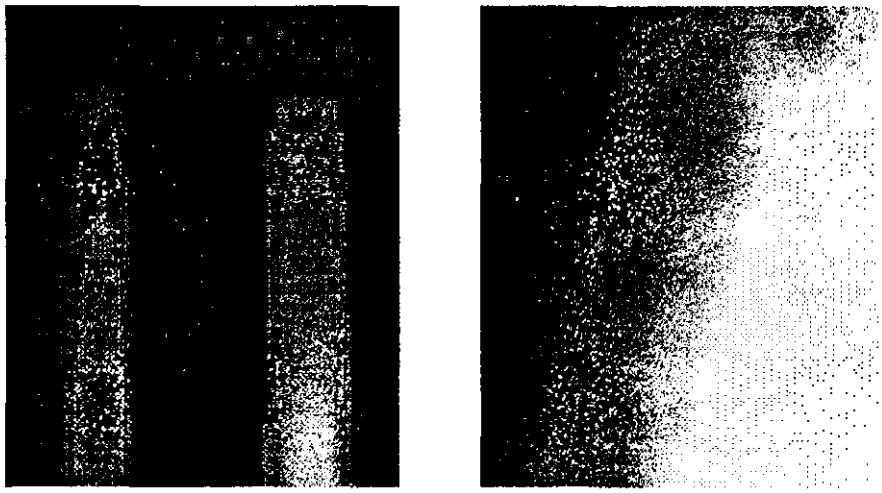
TABELA 3

Média e desvio-padrão das pastilhas de óxido de urânio

Pastilha	Imagem Original			Imagem Processada		
	Média	DP	Faixa	Média	DP	Faixa
I	90,9	15,7	64...111	88,8	18,4	64...111
II	86,8	19,4	64...111	84,3	22,9	64...111
III	84,0	23,0	48...111	80,8	26,7	48...111
IV	52,6	20,0	48...79	48,6	24,2	16...79

NOTA: Os valores da tabela representam níveis de cinza.

A FIG. 19(a) apresenta dois cilindros de cobre [C] e de acrílico [A] que devem ter suas bordas realçadas, a fim de permitir a medição do diâmetro dos mesmos, que é de 11 *mm*. Na FIG. 19(b), observa-se a imagem das condições de iluminação em que foi digitalizada a radiografia dos cilindros.



(a) (b)

FIGURA 19 - (a) Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A]; (b) Padrão de iluminação.

A FIG. 20 mostra a imagem processada dos cilindros de cobre [C] e de acrílico [A]. As operações de PDI aplicadas foram: correção da iluminação, fatiamento de nível (para realce do cilindro de cobre), soma com a imagem original, expansão de

contraste, fatiamento de nível (para realce do cilindro de acrílico) e suavização das bordas (filtro da mediana). Na TAB. 4, encontram-se os resultados das medições automática e manual dos diâmetros dos cilindros, tendo sido encontrados desvios máximos de 3,6 % com relação à medida real.

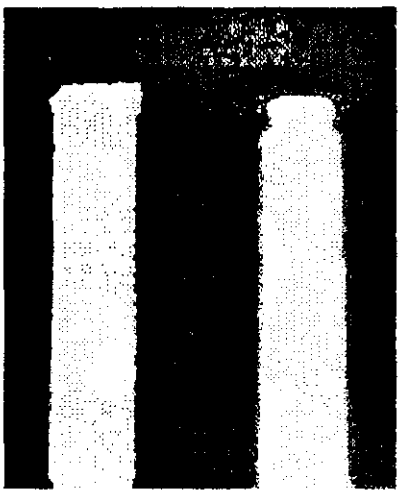


FIGURA 20 - Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A] após processamento.

TABELA 4

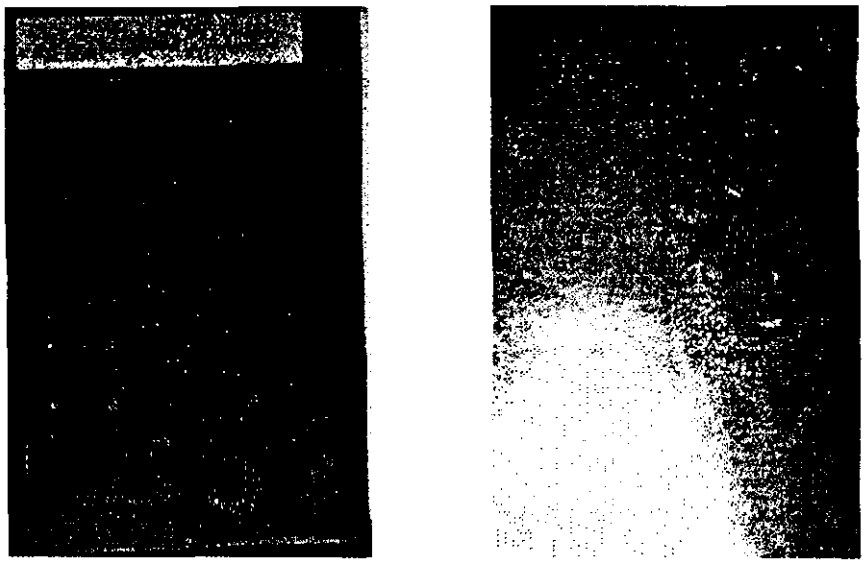
Diâmetro dos cilindros de cobre e de acrílico
(digitalização com *scanner*)

Cilindro	Medida Real	Medida Automática	Medida Manual
Cobre	11,0	11,1	10,6
Acrílico	11,0	11,4	10,6

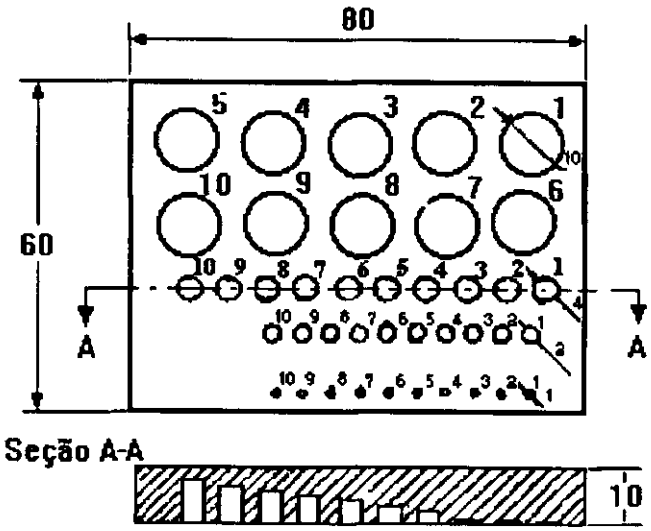
NOTA: Todas as medidas estão em *mm*.

Na FIG. 21(a), encontra-se representado um indicador de sensibilidade neutrongráfica para detecção de corrosão oculta em alumínio. Esse indicador consiste de quatro conjuntos de cavidades de 1,0 *mm*; 2,0 *mm*; 4,0 *mm* e; 10,0 *mm* de diâmetro numa peça de alumínio AA7075, com 10 *mm* de espessura e área de 60 × 80 *mm*, sendo que cada conjunto de cavidades é composto por dez cavidades cujas profundidades são 100 *μm* (1), 500 *μm* (2); 1,0 *mm* (3); 2,0 *mm* (4); 3,0 *mm* (5); 4,0 *mm* (6); 5,0 *mm* (7); 6,0 *mm* (8); 7,0 *mm* (9) e; 8,0 *mm* (10) (os números entre parênteses correpondem à

numeração das cavidades na FIG. 21(c)), preenchidas com hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, principal constituinte dos produtos de corrosão do alumínio. Esse indicador é utilizado para avaliar a sensibilidade da radiografia com nêutrons na detecção de corrosão em estruturas de alumínio (CRISPIM *et al*, 1993a). A partir dessa imagem, deseja-se determinar o contraste mínimo observável, por meio do realce das cavidades e da medição de seus atributos geométricos. A FIG. 21(b) representa o padrão de iluminação durante a digitalização.



(a) (b)



NOTA: Todas as medidas estão em *mm*.

(c)

FIGURA 21 - (a) Indicador de sensibilidade; (b) Padrão de iluminação; (c) Desenho do indicador. FONTE: CRISPIM, 1993, p. 100.

A FIG. 22 mostra a imagem processada do indicador de contraste. As operações de PDI aplicadas foram: correção da iluminação, filtragem espacial (SSDA), limiarização variável (para segmentação das cavidades), fatiamento de nível (para isolamento das cavidades), soma com a imagem original e suavização das bordas (filtro da mediana). Na TAB. 5, encontram-se os resultados da segmentação e da medição automática e manual dos diâmetros das cavidades. Foi possível visualizar os orifícios de 1 *mm* de diâmetro até 3 *mm* de profundidade, todavia as medidas manuais e automáticas dos diâmetros apresentaram desvios médios de 50 % com relação à medida real. Os orifícios de 2 *mm* de diâmetro foram visualizados até 4 *mm* de profundidade, sendo que as medidas manuais e automáticas dos diâmetros apresentaram desvios médios de 13 e 18 %, respectivamente. Os orifícios de 4 *mm* de diâmetro foram visualizados até 2 *mm* de profundidade e as medidas dos diâmetros tiveram desvios médios de 16,6 e 4,6 %, para as medições automática e manual, respectivamente. Por fim, os orifícios de 10 *mm* de diâmetro foram visualizados até 3 *mm* de profundidade, apresentando desvios médios para as medições manual e automática de 1,5 e 3,2 %, respectivamente. Essa diminuição progressiva no desvio apresentado pelas medições, à medida que se opera sobre os orifícios de maior diâmetro, deve-se ao afastamento do limite de resolução espacial inerente ao sistema radiográfico.

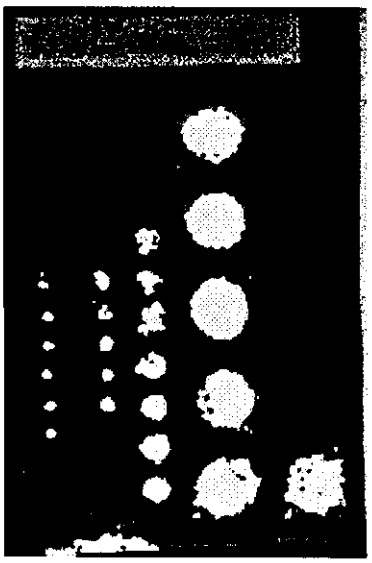


FIGURA 22 - Indicador de contraste após processamento.

A FIG. 23(a) apresenta o indicador de pureza de feixe (BPI - *Beam Purity Indicator*) especificado na Norma ASTM E-545 (*Standard Method for Determining Image Quality in Thermal Neutron Radiography Testing*), recomendado para a determinação quantitativa da qualidade de radiografias com nêutrons (CRISPIM *et al.*,

1993b). Deseja-se realçar as bordas, segmentar a imagem e realizar as medições dimensionais dos diversos componentes da imagem. O padrão de iluminação durante a digitalização dessa radiografia é mostrado na FIG. 23(b).

TABELA 5

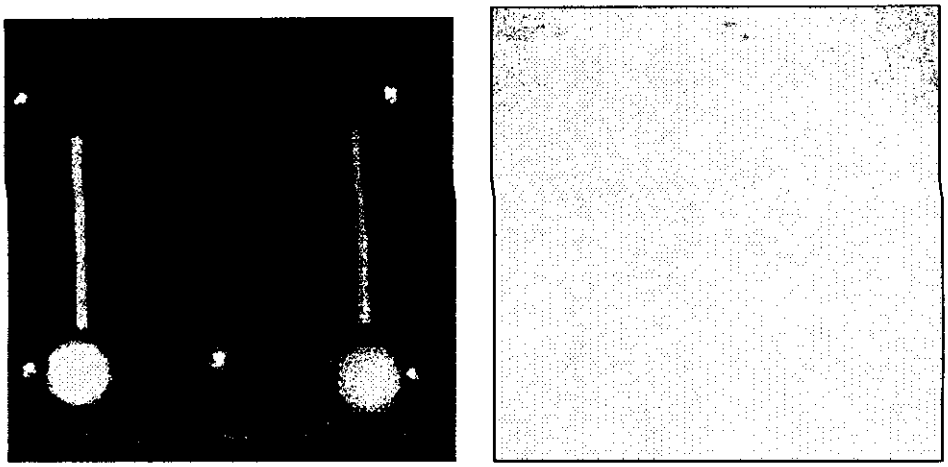
Resultado da segmentação do indicador de contraste

Profundidade	Diâmetros (1)							
	$\phi = 1,0$		$\phi = 2,0$		$\phi = 4,0$		$\phi = 10,0$	
	A	M	A	M	A	M	A	M
0,100	-	-	-	-	-	-	-	-
0,500	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-	4,0	4,2	-	-
3,0	1,3	1,5	-	-	3,9	4,1	10,4	10,0
4,0	1,6	1,4	2,8	2,2	5,0	4,2	10,2	10,2
5,0	1,5	1,3	2,2	2,4	4,9	4,2	10,0	10,2
6,0	1,5	1,5	2,4	2,3	4,4	4,1	10,2	9,9
7,0	1,6	1,6	1,9	1,9	5,0	4,2	10,2	9,9
8,0	1,5	1,3	2,3	2,3	4,4	4,3	10,9	10,3

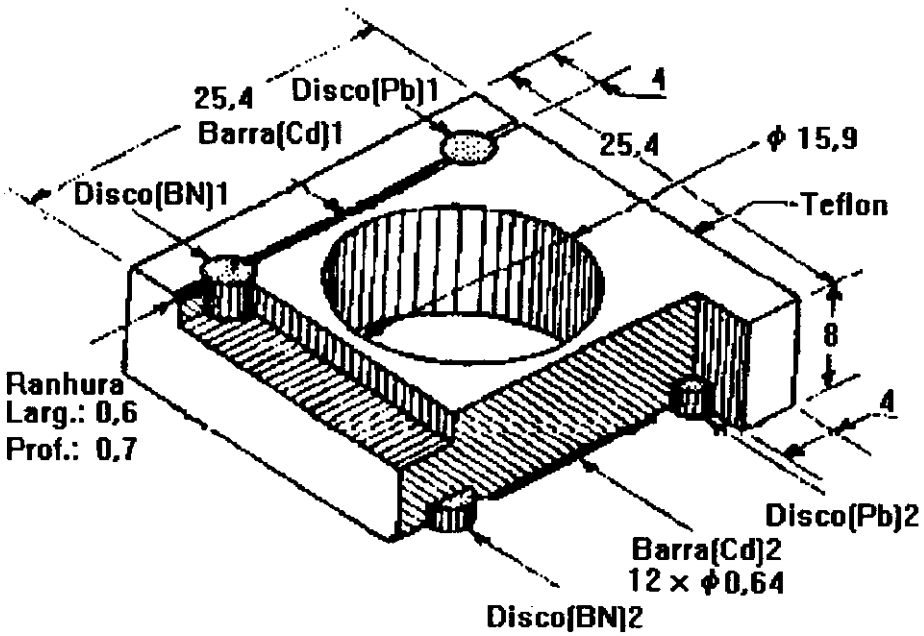
NOTA: (1) Todas as medidas estão em *mm*. (2) A - Medição automática; M - Medição manual.

A FIG. 24 mostra a imagem processada do BPI. As operações de PDI aplicadas foram: correção da iluminação, filtragem espacial (SSDA), limiarização variável (para segmentação dos componentes da imagem), fatiamento de nível (para isolamento das cavidades), soma com a imagem original e suavização das bordas (filtro da mediana). Na TAB. 6, encontram-se os resultados da segmentação e da medição automática e manual das dimensões dos componentes da imagem. Na medição dos diâmetros dos discos e do orifício e do comprimento das barras, o desvio máximo

encontrado foi de 10 %. Todavia, nas medições da largura das barras o desvio foi muito elevado, devido à proximidade dos limites de resolução do próprio sistema radiográfico.



(a) (b)



NOTA: (1) Os discos de Pb e BN (Nitreto de Boro) têm 4 *mm* de diâmetro e 2 *mm* de espessura.
(2) Todas as medidas estão em *mm*.

(c)

FIGURA 23 - (a) BPI segundo a Norma ASTM E-545; (b) Padrão de iluminação; (c) Diagrama do BPI. FONTE: CRISPIM, 1993.

A FIG. 25(a) mostra um IRV para avaliação do contraste observável em radiografias com nêutrons, que consiste de duas cavidades de 8,0 e 10,0 *mm* de diâmetro numa chapa de alumínio, sendo que a cavidade de 10,0 *mm* foi preenchida com $Al(OH)_3$

e a cavidade de 8,0 *mm* foi mantida vazia. Aqui, deseja-se o realce da cavidade vazia, o realce das bordas e o dimensionamento das duas cavidades. O perfil de iluminação durante a digitalização é mostrado na FIG. 25(b).

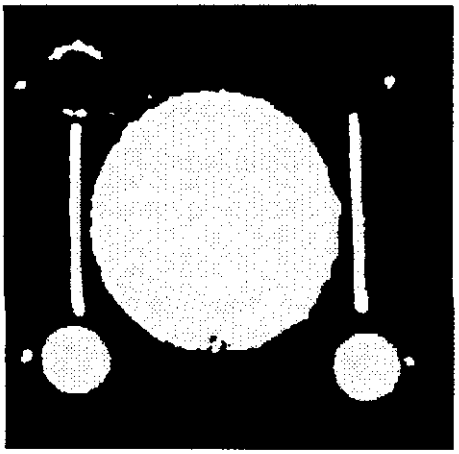


FIGURA 24 - BPI após processamento.

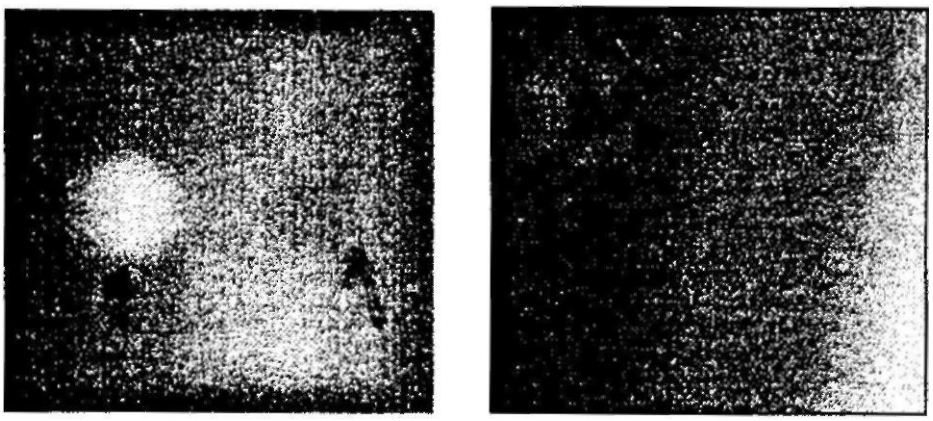
TABELA 6

Resultado da segmentação do BPI
(digitalização com *scanner*)

Região(1)	Medida Real (2)	Medida Automática	Medida Manual
Disco BN-1(3)	4,0	4,4	4,3
Disco BN-2	4,0	4,3	4,1
Disco Pb-1	4,0	-	4,2
Disco Pb-2	4,0	-	-
Orifício	15,9	16,4	16,3
Barra Cd-1 (4)	0,64 × 12	0,85 × 12,3	0,51 × 12,1
Barra Cd-2	0,64 × 12	1,19 × 12,7	0,60 × 12,5

NOTA: (1) Cd: cádmio; Pb: chumbo; BN: nitreto de boro.
(2) Todas as medidas estão em *mm*.
(3) A medida dos orifícios corresponde ao diâmetro.
(4) As medidas das barras correspondem a largura × comprimento.

Na FIG. 26, é mostrada a imagem processada do BPI. As operações de PDI aplicadas foram: expansão de contraste, filtragem *noise cheating*, filtragem espacial (filtro da mediana), expansão de contraste (para realce das cavidades), segmentação das cavidades, suavização das bordas das cavidades (filtro da mediana), fatiamento de nível (para isolamento das cavidades) e soma com a imagem original. Neste caso, não foi aplicada a operação de correção da iluminação porque foi obtido um melhor resultado sem o seu emprego. Na TAB. 7, encontram-se os resultados da segmentação e da medição automática e manual das dimensões das cavidades. A medida automática da cavidade vazia, que não teve a sua forma original restaurada (circular), corresponde à média dos seguintes valores fornecidos pelo analisador: altura máxima, largura máxima e diâmetro equivalente, enquanto que a medida manual corresponde à média de quatro valores: altura, largura e duas diagonais. O desvio máximo encontrado nas medições foi de 3,75 %.



(a) (b)

FIGURA 25 - (a) IRV em alumínio; (b) Padrão de iluminação.

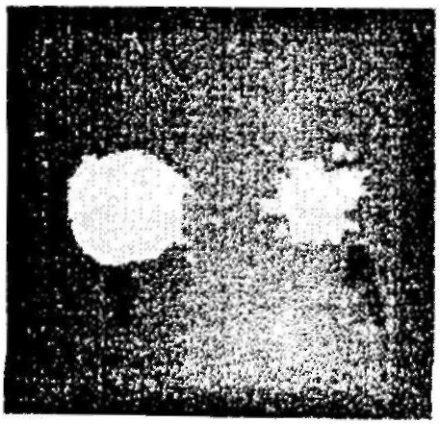
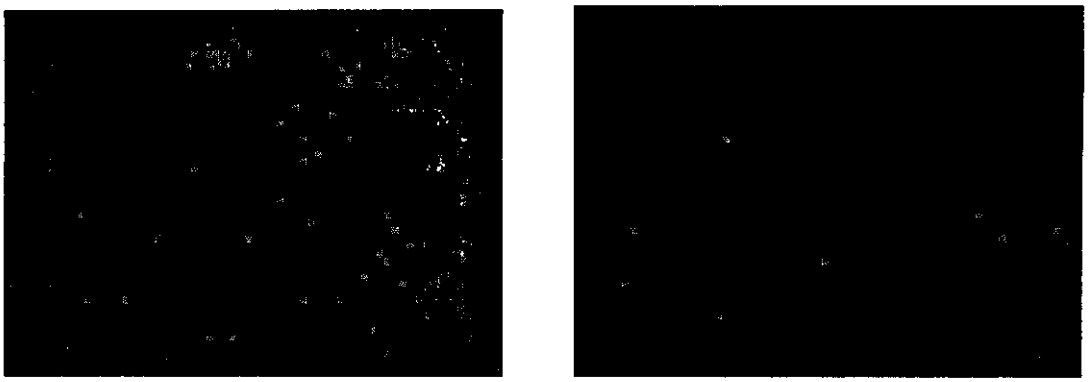


FIGURA 26 - IRV em alumínio após processamento.

A FIG. 27(a) apresenta uma amostra de estrutura de aeronave do tipo colméia construída em alumínio e madeira. Deseja-se o realce das regiões onde se verifica corrosão do alumínio e apodrecimento da madeira. A FIG. 27(b) mostra as condições de iluminação. Na FIG. 28, é mostrada a imagem processada da estrutura. As operações de PDI aplicadas foram: suavização (aplicação do filtro da mediana), expansão de contraste, filtragem *noise cheating* e limiarização (para segmentação das áreas que sofreram deterioração). As setas nas FIG. 27(a) e 28 indicam a corrosão do alumínio.



(a) (b)

FIGURA 27 - (a) Estrutura de aeronave do tipo colméia; (b) Padrão de iluminação.

FIGURA 28 - Estrutura de aeronave do tipo colméia após processamento.

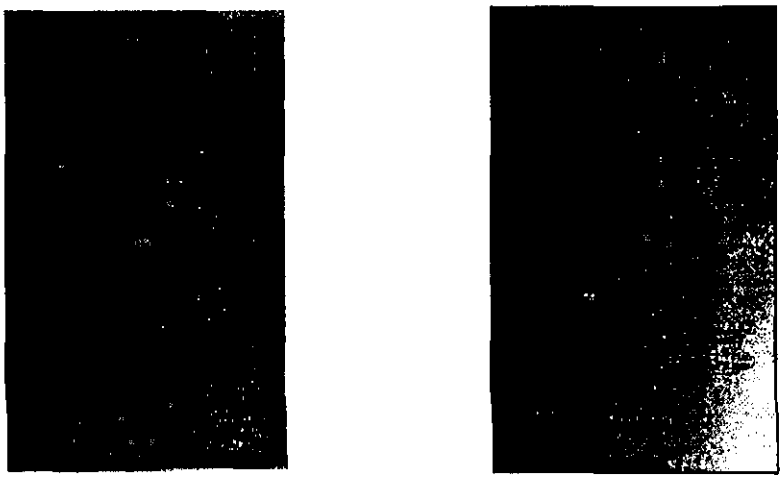
Na FIG. 29(a), encontra-se a imagem de uma peça de alumínio que sofreu os efeitos de corrosão por esfoliação. Deseja-se realçar as regiões onde ocorreu corrosão. As condições de iluminação durante a digitalização são representadas na FIG. 29(b). A FIG. 30 mostra a imagem processada da placa de alumínio com corrosão. As operações de PDI aplicadas foram: suavização (SSDA), equalização histogrâmica, reversão, limiarização variável (para segmentação das regiões), expansão de contraste e filtragem *noise cheating*.

TABELA 7

Dimensionamento das cavidades do IRV em alumínio
(digitalização com *scanner*)

Cavidade	Medida Real	Medida Automática	Medida Manual
Vazia	8,0	8,2	8,3
Preenchida com $Al(OH)_3$	10,0	10,3	10,0

NOTA: Todas as medidas estão em *mm*.



(a) (b)

FIGURA 29 - (a) Placa de alumínio esfoliada; (b) Padrão de iluminação.

FIGURA 30 - Placa de alumínio esfoliada após processamento.

5.3 Imagens negativas, registradas em filme, capturadas pela câmara de vídeo

As imagens apresentadas nas FIG. 31 a 37, a seguir, foram capturadas por uma câmara de vídeo CCD *Sony* DXC-107, acoplada a um *frame-grabber*, a partir de imagens negativas, registradas em filme radiográfico, produzidas nas instalações radiográficas com nêutrons dos reatores IPR-R1 e Argonauta. Essas imagens, já descritas anteriormente nesse capítulo, serão utilizadas para avaliar a influência da técnica de digitalização nos resultados obtidos com a aplicação de funções de PDI às mesmas. Todas essas imagens foram submetidas à operação de correção da razão de aspecto, descrita no cap. 4, antes de serem processadas. Essas figuras representam imagens digitalizadas a partir de um quadro de vídeo e a partir da média de 30 quadros de vídeo (para as radiografias produzidas no reator IPR-R1) e de 100 quadros de vídeo (para as radiografias produzidas no reator Argonauta), a fim de permitir a comparação entre o uso de imagens diretas e imagens integradas. As radiografias produzidas no reator Argonauta foram capturadas com 100 quadros de vídeo porque se desejava o realce e a segmentação dessas imagens, sendo importante, portanto, que as imagens apresentassem menos ruído. As radiografias produzidas no reator IPR-R1, por sua vez, foram apresentadas aqui apenas com a finalidade de se ilustrar a diferença entre imagens simples e imagens integradas e, para isso, foi suficiente capturá-las com 30 quadros de vídeo.

5.3.1 Radiografias produzidas no reator IPR-R1

As FIG. 31 e 32, a seguir, mostram as radiografias da folha verde de hibisco e da ante-coxa de galinha (ver FIG. 11 e 12), respectivamente, digitalizadas pela câmara de vídeo. Aqui, as imagens processadas foram submetidas apenas às operações de expansão de contraste e de equalização histogâmica a fim de realçar as diferenças entre a imagem de um quadro e a imagem da média de 30 quadros. Observa-se que as imagens integradas apresentam menos ruído devido à granularidade do filme, pois o mesmo foi eliminado pela operação de média de quadros.

5.3.2 Radiografias produzidas no reator Argonauta

As FIG. 33(a) e (b) mostram a radiografia de dois cilindros, um de cobre [C] e outro de acrílico [a], correspondendo a um quadro e à média de 100 quadros de vídeo, respectivamente. Nas FIG. 33(c) e (d) são mostradas as imagens acima após a

segmentação (limiarização variável) e a suavização (filtro da mediana) das mesmas. Na TAB. 8, encontram-se resumidos os resultados da medição dos diâmetros dos dois cilindros. Essas medições apresentaram um desvio máximo de 6,4 %, ou seja, um pouco superior àqueles correspondentes à TAB. 4.

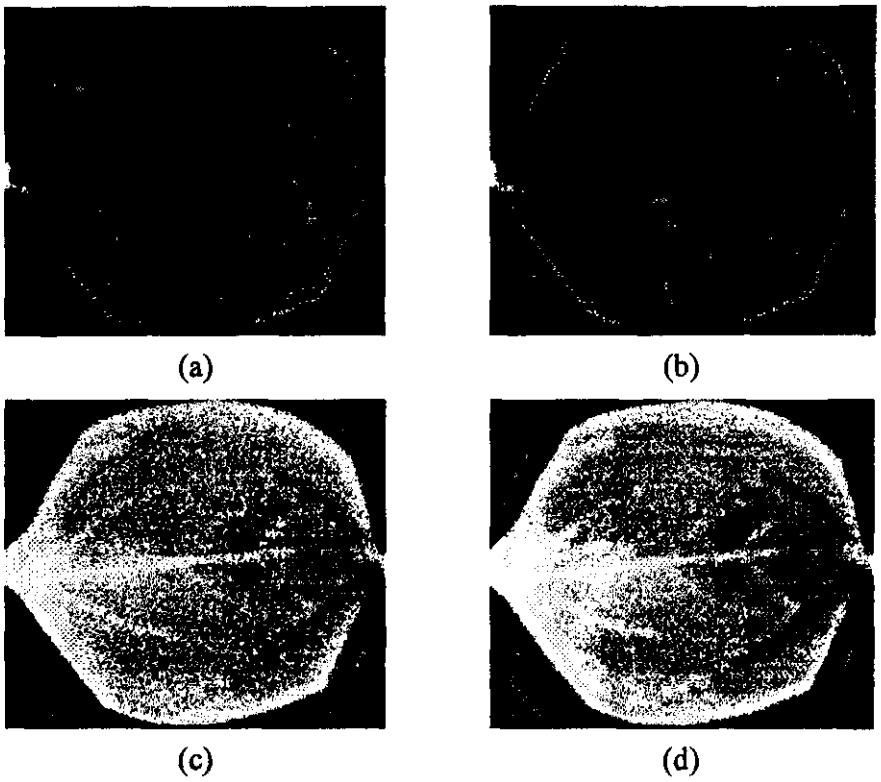


FIGURA 31 - Folha verde de hibisco. Originais (a) um quadro; (b) 30 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 30 quadros.

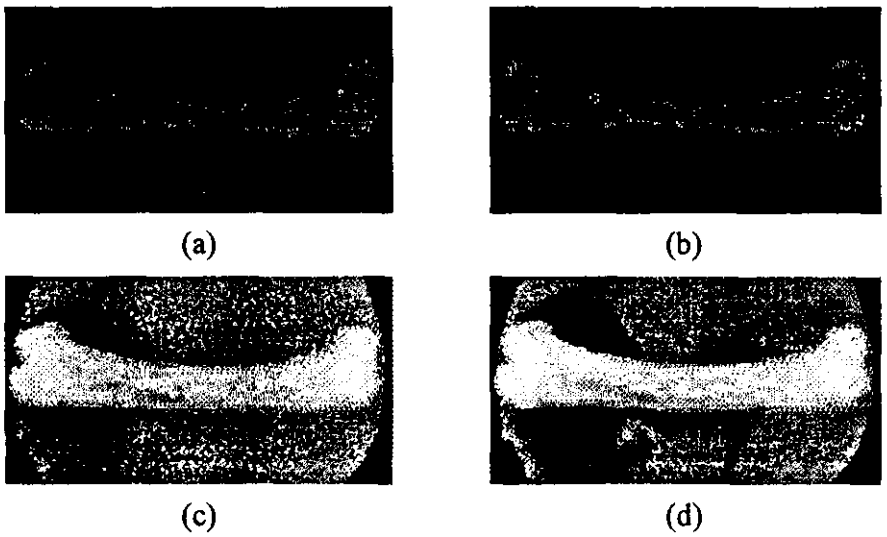


FIGURA 32 - Ante-coxa de galinha. Originais (a) um quadro; (b) 30 quadros. Processadas (a) um quadro; (b) 30 quadros.

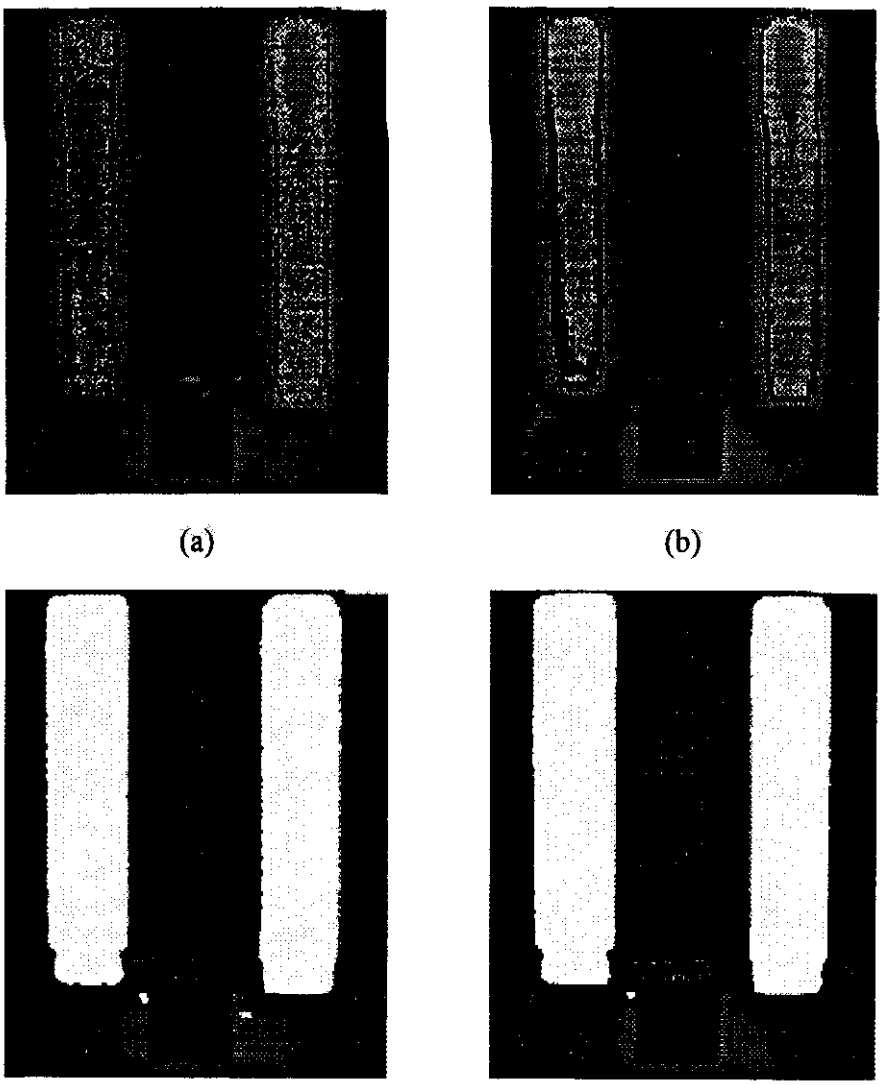


FIGURA 33 - Cilindros de cobre [C] e de acrílico [A]. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros.

As FIG. 34(a) e (b) mostram a radiografia do indicador de sensibilidade BPI, correspondendo a um quadro e à média de 100 quadros de vídeo, respectivamente. Nas Fig. 34(c) e (d) são mostradas as imagens acima após a segmentação (limiarização variável) e a suavização (filtro da mediana) das mesmas. Na TAB. 9, encontram-se resumidos os resultados da medição das dimensões dos componentes da imagem. Esses resultados foram coerentes com aqueles apresentados na TAB. 6. O desvio máximo encontrado nas medições dos diâmetros e dos comprimentos das barras foi de 7,0 %, enquanto que na medição da largura das barras o desvio foi muito elevado (média de 41,8 %) devido à proximidade do limite de resolução espacial do sistema radiográfico.

TABELA 8

Diâmetro dos cilindros de cobre e de acrílico
(digitalização com câmara de vídeo)

Cilindro	Medida Real	1 Quadro		100 Quadros	
		Medida Automática	Medida Manual	Medida Automática	Medida Manual
Cobre	11,0	10,6	9,9	10,0	9,7
Acrílico	11,0	11,0	10,3	10,8	10,4

NOTA: Todas as medidas estão em *mm*.

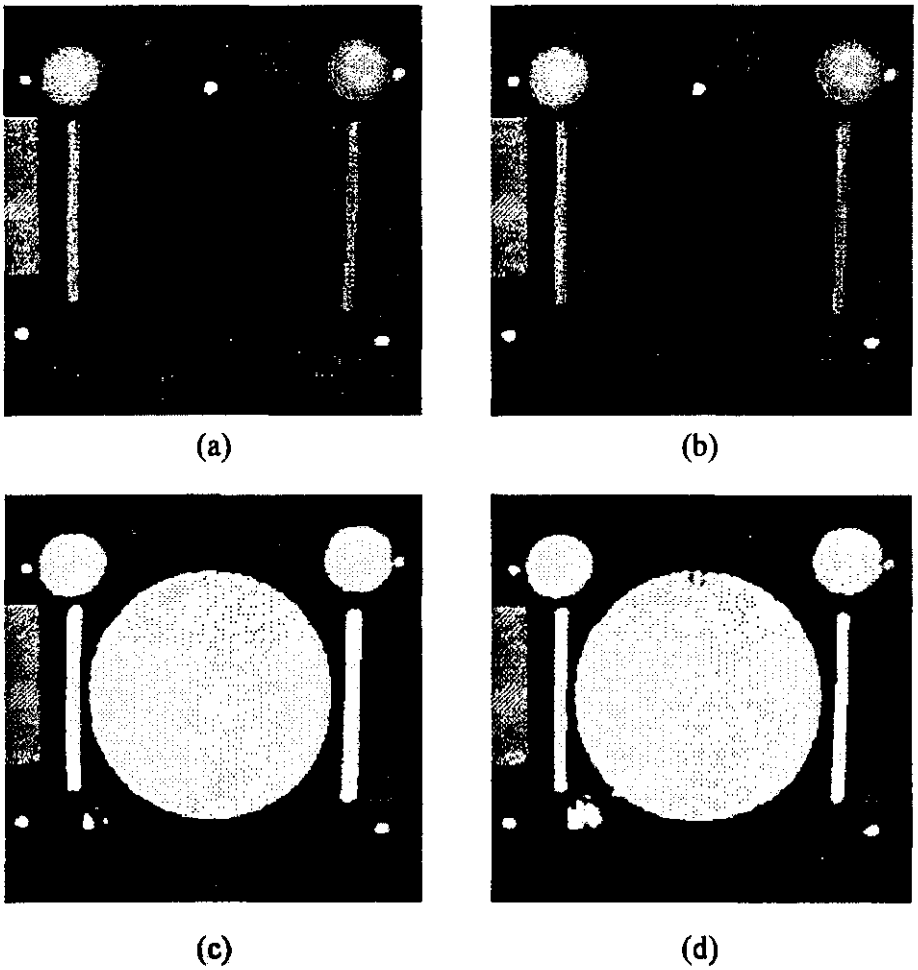


FIGURA 34 - BPI segundo a Norma ASTM E-545. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros.

As FIG. 35(a) e (b) mostram a radiografia do IRV em alumínio, correspondendo a um quadro e à média de 100 quadros de vídeo, respectivamente. Nas Fig. 35(c) e (d) são mostradas as imagens acima após a expansão de contraste, filtragem passa-baixas (filtro da mediana), segmentação dos orifícios (limiarização variável) e suavização das bordas (filtro da mediana). Na TAB. 10, encontram-se resumidos os resultados da medição dos diâmetros das duas cavidades presentes no IRV. O desvio máximo encontrado nas medições foi de 2 %. Esses resultados foram coerentes com aqueles apresentados na TAB. 7. Observa-se, todavia, que a cavidade vazia pode ser apenas parcialmente realçada devido a um forte gradiente de iluminação existente na região a ela correspondente. Neste caso, como não foi possível recuperar a forma circular da cavidade vazia, as medidas apresentadas na TAB. 7, referentes àquela cavidade, correspondem à altura da região.

TABELA 9

Resultado da segmentação do BPI
(digitalização com câmara de vídeo)

Região (1)	Medida Real (2)	1 Quadro		100 Quadros	
		Medida Automática	Medida Manual	Medida Automática	Medida Manual
Disco BN-1(3)	4,0	4,1	4,0	4,1	4,0
Disco BN-2	4,0	4,2	4,2	4,2	4,3
Disco Pb-1	4,0	-	-	-	-
Disco Pb-2	4,0	-	-	-	-
Orifício	15,9	15,4	15,3	15,6	15,6
Barra Cd-1 (4)	0,64 × 12	1,01 × 11,6	0,70 × 11,5	0,86 × 11,5	0,63 × 11,5
Barra Cd-2	0,64 × 12	1,41 × 12,0	0,86 × 11,9	1,06 × 11,9	0,71 × 11,9

NOTA: (1) Cd: cádmio; Pb: chumbo; BN: nitreto de boro.
(2) Todas as medidas estão em *mm*.
(3) A medida dos orifícios corresponde ao diâmetro.
(4) As medidas das barras correspondem a largura × comprimento.

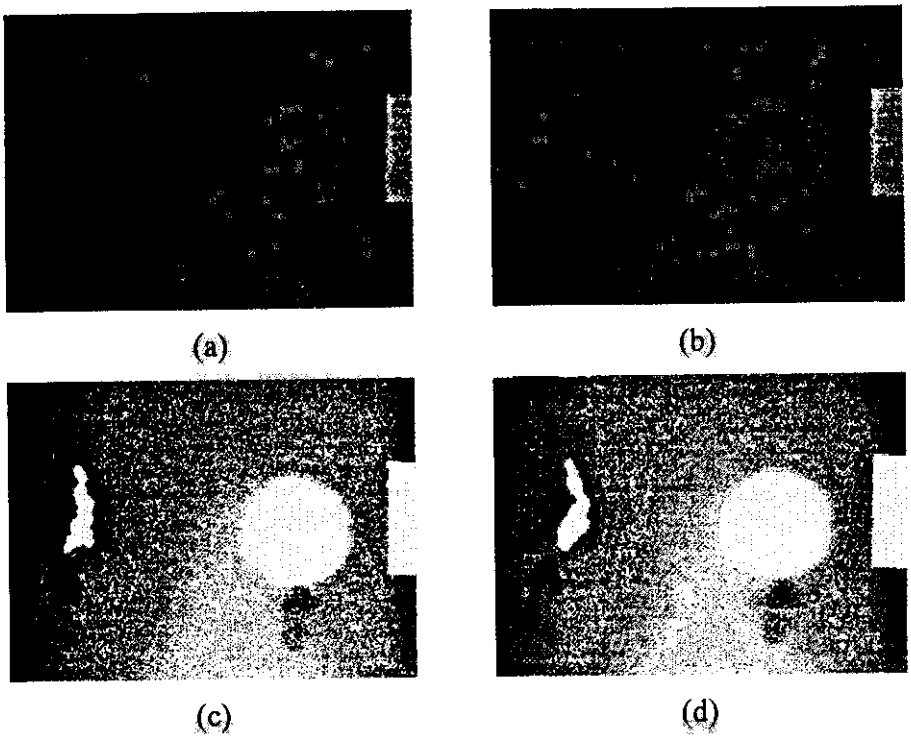


FIGURA 35 - IRV em alumínio. Originais (a) um quadro; (b) 100 quadros. Processadas (c) um quadro; (d) 100 quadros. As setas nas imagens indicam as cavidades.

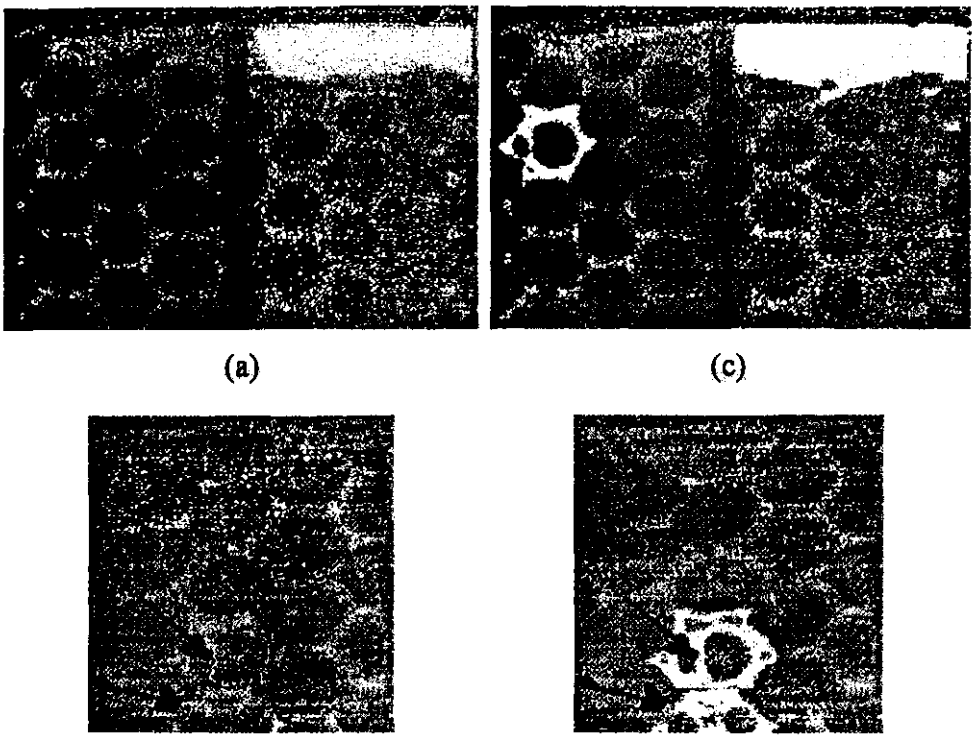
TABELA 10

Dimensionamento das cavidades do IRV em alumínio
(digitalização com câmara de vídeo)

Cavidade	Medida Real	1 Quadro		100 Quadros	
		Medida Automática	Medida Manual	Medida Automática	Medida Manual
Vazia	8,0	7,9	7,9	8,0	8,0
Preenchida com $Al(OH)_3$	10,0	9,9	10,0	9,8	9,8

NOTA: Todas as medidas estão em *mm*.

As FIG. 36(a) e (b) mostram duas amostras de uma estrutura de aeronave do tipo colméia construídas em alumínio e madeira. Deseja-se o realce das regiões onde se verifica corrosão do alumínio e apodrecimento da madeira. Nas FIG. 36(c) e (d) são mostradas as mesmas imagens após serem processadas. As operações de PDI aplicadas foram: filtragem *noise cheating* e limiarização (para segmentação das áreas que sofreram deterioração). Neste caso, como não foi observada uma diferença significativa no resultado obtido entre imagens digitalizadas com um quadro e com 100 quadros, foram apresentados apenas os resultados relativos a imagens de um quadro.

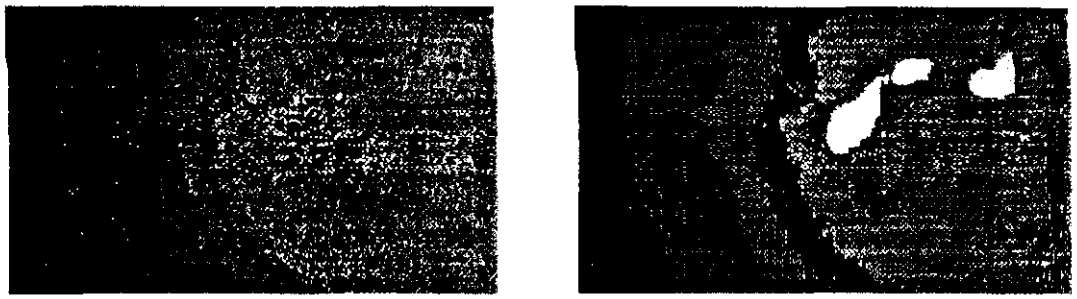


(a) (c)

(b) (d)

FIGURA 36 - Estrutura de aeronave do tipo colméia (um quadro): (a) e (b) Originais; (c) e (d) Processadas. As setas nas imagens indicam as áreas deterioradas.

Na FIG. 37(a), encontra-se a imagem de uma peça de alumínio que sofreu os efeitos de corrosão por esfoliação. Deseja-se realçar as regiões onde ocorreu corrosão. A FIG. 37(b) mostra a imagem processada da região com corrosão. As operações de PDI aplicadas foram: limiarização variável (para segmentação das regiões), expansão de contraste e suavização (filtro da mediana). Aqui, foram apresentadas apenas imagens de um quadro por não se observar uma diferença significativa nos resultados obtidos a partir de imagens de 100 quadros.



(a) (b)

FIGURA 37 - Placa de alumínio esfoliada (um quadro): (a) original; (b) processada. As setas indicam as regiões onde a corrosão foi mais acentuada.

5.4 Conclusões

Neste capítulo, foram apresentadas as imagens radiográficas com nêutrons digitalizadas através de três técnicas: (a) digitalização de imagens positivas, registradas em papel fotográfico, usando-se o digitalizador de mesa *ScanJet IIp*, da *Hewlett Packard*; (b) digitalização de negativos radiográficos, usando-se o digitalizador de mesa *ScanJet IIp* e; (c) digitalização de negativos radiográficos, empregando-se uma câmara de vídeo CCD, *Sony* DXC-107, acoplada a um *frame-grabber*.

Dentre as três técnicas de digitalização, o uso do *scanner* para digitalização de imagens positivas registradas em filme radiográfico é a mais simples. Todavia, essas imagens possuem degradações adicionais, devidas ao processo de revelação do filme radiográfico, quando comparadas com seus respectivos negativos. Por outro lado, a digitalização dos negativos radiográficos enfrenta os problemas devidos à dificuldade de se obter uma fonte de luz suficientemente intensa e homogênea, capaz de vencer a densidade óptica dos filmes.

Quanto às dimensões das imagens a serem digitalizadas, o *scanner* é capaz de digitalizar imagens positivas, registradas em papel fotográfico de até 216 × 297 *mm*. A digitalização de negativos radiográficos, empregando-se o *scanner*, poderia ser realizada, teoricamente, para imagens das mesmas dimensões supra-citadas. Todavia, devido à dificuldade de se obter uma iluminação uniforme da superfície do *scanner* para áreas dessa grandeza, recomenda-se sua utilização para imagens de aproximadamente 50 × 50 *mm*. Essa deficiência pode ser contornada desenvolvendo-se uma fonte de iluminação capaz de iluminar uniformemente a superfície do digitalizador ou, alternativamente, adquirindo-se um acessório para o *scanner* que permita a digitalização de transparências. A câmara de vídeo, por sua vez, apresenta bons resultados para imagens de até 100 × 100 *mm*.

Ainda que a seqüência de operações de PDI aplicadas às imagens para se obter um dado resultado seja não-determinística e, portanto, bastante subjetiva, pode-se recomendar a utilização de certas operações em função da imagem de entrada e das características que se pretende realçar. Imagens radiográficas apresentam ruídos devidos à granularidade do filme e aos efeitos do pontilhamento, o que torna necessária a aplicação de uma filtragem a essas imagens, a fim de reduzir a influência desses ruídos sobre as mesmas. Além disso, as imagens apresentam baixo contraste, tornando-se necessário aplicar expansão de contraste ou equalização histogrâmica, com a finalidade de se aumentar o contraste das mesmas, permitindo uma melhor identificação das

diferentes regiões ou componentes presentes nas imagens. Negativos radiográficos digitalizados pelo *scanner* apresentam gradientes de iluminação devido à falta de uniformidade das fontes de luz disponíveis, o que torna praticamente compulsória a aplicação da operação de correção da iluminação, antes de se aplicar qualquer outra operação de PDI. Imagens digitalizadas por meio da câmara de vídeo apresentam deformação geométrica devido à falta de correspondência entre as razões de aspecto do *frame-grabber*, da câmara de vídeo e do monitor, tornando obrigatória a aplicação da operação de correção da razão de aspecto.

Para a realização de segmentação e extração de atributos das imagens, é necessário efetuar-se uma inspeção do histograma da mesma, seja total, seja de regiões específicas. Essa inspeção do histograma subsidia a definição dos limiares de segmentação. Sempre que possível, é recomendável a segmentação parcial da imagem, de forma a facilitar a escolha dos limiares, produzindo melhores resultados.

O algoritmo de segmentação e de medições dimensionais, empregado para a medição de áreas, perímetros e distâncias, realiza essas operações conforme descrito no cap. 4 e em ANDRADE (1993). Entretanto, é importante destacar que quanto às medições de perímetros e distâncias, que foram realizadas nas formas manual (realizada pelo próprio usuário) e automática (realizada pelo *software*), há ainda alguns comentários adicionais: (a) a medição automática de perímetros apresenta grandes desvios em relação ao perímetro real, quando se trata de dimensões próximas da resolução espacial inerente ao sistema radiográfico. A mesma observação é válida para a medição automática de áreas e distâncias; (b) o analisador oferece três medidas automáticas de distância para cada região inspecionada: largura máxima ($L_{máx}$), altura máxima ($H_{máx}$) e diâmetro equivalente (D_{eq}). No caso de medidas de regiões circulares, o valor considerado para a medida automática foi a média desses três valores, enquanto que para as demais regiões foi considerada $L_{máx}$ ou $H_{máx}$, conforme o caso; (c) a medida manual de perímetros foi realizada utilizando-se a aproximação por poligonais. Essa medida apresentou resultados bem próximos ao valor real (desvios da ordem de 5 %) para dimensões maiores ou iguais ao dobro da resolução própria do sistema radiográfico; (d) a medida manual de distâncias consistiu na realização de várias medidas, diretamente sobre as regiões, utilizando-se o *mouse*, tendo sido considerado o valor médio dessas medidas (diâmetro, largura ou altura).

Aparentemente, as imagens capturadas a partir da câmara de vídeo e do *frame-grabber* parecem apresentar melhor definição do que aquelas capturadas pelo *scanner*. Entretanto, observou-se que as medições realizadas sobre as imagens

capturadas pela câmara de vídeo apresentaram desvios superiores àquelas realizadas sobre imagens semelhantes capturadas pelo *scanner*. Isto deve-se aos seguintes fatores: (a) a câmara de vídeo deve ter o seu foco ajustado pelo usuário, o que, com certeza, introduz algum erro, enquanto no *scanner* o foco é automático; (b) as razões de aspecto da câmara de vídeo e do *frame-grabber* utilizados não são compatíveis entre si, tornando necessária a aplicação da operação de correção da razão de aspecto, o que introduz distorções adicionais nas imagens; (c) as imagens capturadas pela câmara de vídeo devem ser calibradas utilizando-se um padrão de medida, a fim de se determinar o aumento sofrido pelas mesmas em função do conjunto óptico. Essa operação introduz erros adicionais e não é empregada quando se utiliza o *scanner*, que possui aumento unitário e permite a escolha da resolução utilizada durante a digitalização (100, 200, 300 *dpi*, p. ex.); (d) as imagens capturadas na forma de um quadro apresentam um nível de ruído bastante superior àquelas capturadas por meio da integração de 100 quadros. Todavia, a integração de quadros corresponde a uma operação de média, o que causa acentuado borramento das bordas.

Os problemas e as desvantagens relacionados com a utilização da câmara de vídeo e do *frame-grabber* não inviabilizam o seu emprego na digitalização de radiografias, pois os resultados obtidos por essa técnica podem ser considerados bastante satisfatórios, ainda que inferiores aos obtidos quando se emprega o *scanner*. Além disso, as experiências empregando-se a câmara de vídeo permitiram que se estimasse alguns problemas a serem contornados ao implantar-se um sistema de *imageamento* em tempo real.

A definição dos limiares utilizados na segmentação das imagens é bastante crítica e subjetiva e, aliada à imprecisão característica na definição das bordas em imagens radiográficas com nêutrons, devida ao espalhamento que ocorre na interação dos nêutrons e dos núcleos dos materiais, contribui para os desvios observados entre as medições (automática e manual) e o valor real. Esse problema pode ser contornado pela utilização de uma função automática de reconhecimento de bordas, como a LSF (*Line Spread Function*) (HARMS *et al.*, 1972).

Ainda assim, os resultados das medições de atributos geométricos de componentes presentes nessas imagens foram bastante satisfatórios, principalmente quando se avalia os desvios verificados nessas medições, que foram, em média, inferiores a 10 %.

6 CONCLUSÕES

Todas as coisas têm seu tempo e todas passam debaixo do céu segundo o tempo que a cada uma foi prescrito. Há tempo de nascer e tempo de morrer. Há tempo de plantar e tempo de arrancar o que se plantou...

Kohelet, 3

Nesta dissertação, descreveu-se um sistema de análise de imagens radiográficas produzidas através da radiografia com nêutrons, denominado NEUTRA. Foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica, tendo como marco o trabalho pioneiro de KALLMANN (1948), sobre o desenvolvimento da técnica radiográfica com nêutrons e sobre a aplicação das técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) às imagens produzidas por nêutrons. A aquisição das imagens radiográficas, disponíveis nas formas de negativos radiográficos e de positivos em papel fotográfico, foi realizada utilizando-se um digitalizador de mesa (*scanner*) *HP ScanJet IIp* e uma câmara de vídeo *Charged Coupled Device* (CCD - dispositivo acoplado por cargas) *Sony* DXC-107, acoplada a uma placa digitalizadora (*frame-grabber*). O analisador de imagens desse sistema foi desenvolvido a partir da plataforma *PixelWare*, concebida no DCC-UFMG, sendo que foi criado um módulo de análise de imagens radiográficas, ao qual foram incorporadas as funções de PDI que mais se adequam à análise de imagens produzidas por radiografia com nêutrons.

A seguir, são apontadas as modificações que podem ser realizadas na atual versão do sistema NEUTRA, com a finalidade de aperfeiçoá-lo e melhorar o seu desempenho, como: migração para uma plataforma de *software* que possibilite a utilização dos recursos oferecidos pelo ambiente *Windows* (a plataforma *PHOTOPIX*, desenvolvida no DCC-UFMG), integração das diversas operações do sistema (digitalização, conversão, processamento e visualização) e implantação do *imageamento* em tempo real.

6.1 Desenvolvimentos futuros

O sistema NEUTRA pode ser considerado como sendo uma base conceitual para o desenvolvimento de um sistema mais moderno e poderoso, que utilize uma plataforma de *hardware* e *software* de melhor desempenho, que proporcione uma maior integração das funções de aquisição de imagens, conversão de formatos e processamento das imagens. É desejável que essa plataforma possua recursos para a realização de análise automática ou semi-automática de imagens e, principalmente, que seja capaz de realizar *imageamento* radiográfico em tempo real.

6.1.1 Migração para a plataforma *PHOTOPIX*

A plataforma *PHOTOPIX* (SOL, 1993) (SOL & ARAÚJO, 1993), desenvolvida no DCC-UFMG, fornece uma base conceitual e prática para sistemas de PDI, permitindo isolar a implementação de algoritmos de PDI da codificação de funcionalidades não-essenciais, tais como: manutenção da interface aplicativo-usuário, leitura e escrita de arquivos ou tratamento de restrições da *Application Programming Interface* (API) e do *hardware* utilizados.

A especificação do *PHOTOPIX* atende aos princípios da análise essencial e sua arquitetura interna é baseada no paradigma da programação orientada para objetos, utilizando a linguagem *C++*, tendo sido implementado a partir da API do ambiente operacional *Microsoft Windows*. A opção pelo uso de técnicas de programação orientada para objetos deve-se a sua adequação quando se deseja encapsular detalhes de programação e garantir a independência dos módulos que constituem o sistema. O formato interno para as imagens, denominado *Packed-DIB*, foi escolhido por ser compatível com diversas primitivas do ambiente *Microsoft Windows*. A ampliação das funcionalidades do *PHOTOPIX* é bastante facilitada pelo isolamento entre as classes desenvolvidas e qualquer código-fonte de algoritmo de PDI, implementado em linguagem *C*, pode ser facilmente adaptado para o *PHOTOPIX*.

A migração do *software* desenvolvido para o sistema NEUTRA da interface *PixelWare* para a plataforma *PHOTOPIX* representa um grande avanço por possibilitar a utilização das potencialidades e dos recursos que o ambiente *Windows* oferece, como execução simultânea de dois ou mais aplicativos, transferência de informação entre aplicativos e a eficiência da interface gráfica. Além disso, o isolamento entre as classes desenvolvidas na plataforma *PHOTOPIX* possibilita uma rápida detecção e correção de

erros na implementação de uma determinada funcionalidade, uma vez que o *PHOTOPIX* define uma API específica para a codificação de algoritmos de processamento de imagens.

6.1.2 Integração de funções

Atualmente, as funções de aquisição e de processamento de imagens têm sido executadas em diferentes ambientes, enquanto é altamente desejável trabalhar em um único ambiente, capaz de suportar todas as funções utilizadas pelo sistema NEUTRA. Assim, deve-se dotar a plataforma de suporte do analisador de imagens radiográficas com recursos que integrem o uso de digitalizadores de imagens, de programas conversores de formato e de rotinas de processamento de imagens em um único sistema. Essa integração tem por objetivo otimizar o uso do analisador por parte dos especialistas em radiografias com nêutrons, graças à redução na complexidade e na diversidade das operações executadas desde a aquisição até a visualização das imagens radiográficas processadas digitalmente.

6.1.3 *Imageamento* em tempo real

Tipicamente, um sistema de radiografia com nêutrons em tempo real é composto de quatro partes: uma fonte de nêutrons, um conversor de nêutrons, um sistema de detecção e um dispositivo de visualização e de processamento de imagens. Na TAB. 11, é apresentada a correspondência entre esse sistema típico e o sistema em desenvolvimento para o reator IPR-R1.

A maioria dos sistemas radiográficos com nêutrons em tempo real tem empregado foto-multiplicadores ou intensificadores de luz entre a tela conversora de nêutrons e a câmara de vídeo para amplificar a radiação secundária produzida pelos nêutrons incidentes na tela conversora, conforme pode ser observado no ANEXO A (FIG. 46). Entretanto, é possível a eliminação desses intensificadores de luz empregando-se uma câmara de vídeo de alta sensibilidade (FUJINE *et al.*, 1987a,b) e aplicando-se funções de PDI, como integração de quadros, p. ex., para melhorar a qualidade das imagens obtidas, como é representado pela FIG. 38.

Embora a qualidade das imagens radiográficas em tempo real seja inferior àquela obtida pelo método por exposição direta do filme radiográfico, o sistema de *imageamento* em tempo real permite que um grande número de objetos seja

inspecionado num intervalo de tempo significativamente menor, elimina as degradações sofridas pelas imagens em função do processo fotográfico e possibilita a inspeção de fenômenos dinâmicos e de objetos em movimento (FUJINE, 1985).

TABELA 11

Correspondência entre um sistema típico de radiografia com nêutrons em tempo real e o sistema em desenvolvimento no CDTN

SISTEMA TÍPICO	SISTEMA PROPOSTO
Fonte de nêutrons	Reator IPR-R1
Conversor de nêutrons	Tela cintiladora
Sistema de detecção	Câmara de vídeo e interface de digitalização de imagens (*frame-grabber*)
Dispositivo de visualização e processamento de imagens	Monitor de vídeo, microcomputador compatível com IBM 486DX e rotinas de PDI incorporadas à plataforma *PHOTOPIX*

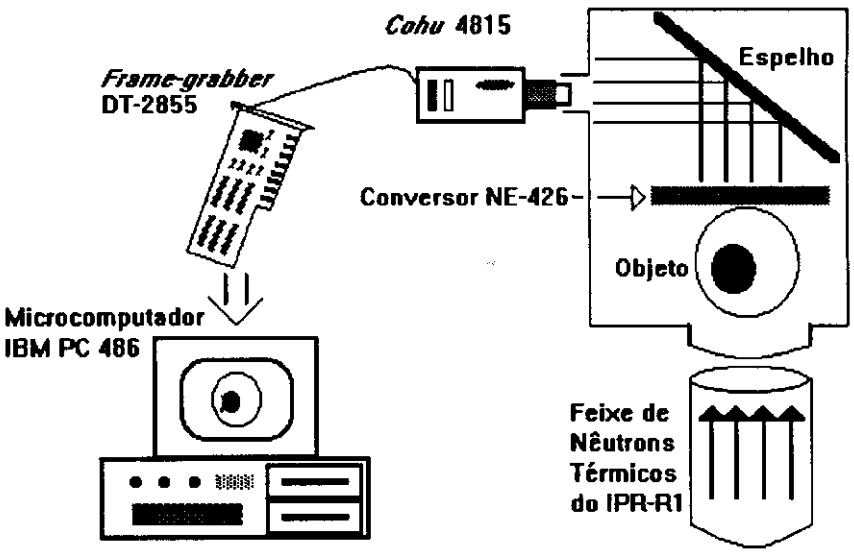


FIGURA 38 - *Imageamento* em tempo real no reator IPR-R1.

Um *software* para operar em tempo real deve ser capaz de interagir com entidades e eventos do mundo real, sendo que a especificação de sistemas em tempo real sofre restrições, quanto ao seu comportamento e quanto à definição de seus estados, devido às dificuldades enfrentadas na temporização dos eventos. Ou seja, o mundo real é extremamente dinâmico e um *software* em tempo real deve ser capaz de se adaptar as suas modificações. BIHARI & GOPINATH (1992) investigaram a utilização de programação orientada para objetos no projeto de sistemas de *software* em tempo real, concluindo que as técnicas orientadas para objetos, quando utilizadas de forma apropriada, produzem *softwares* compreensíveis, reutilizáveis, com independência funcional e temporal entre entidades, e adaptáveis a modificações dinâmicas de suas estruturas. Desta forma, a plataforma *PHOTOPIX* atenderia plenamente a essas exigências, necessitando ser dotada de recursos para executar funções de PDI em imagens de tempo real, como integração de quadros, média de imagens múltiplas e visualização de imagens capturadas por uma câmara de vídeo e um *frame-grabber*.

6.2 Comentários finais

A radiografia com nêutrons é uma técnica de Ensaio Não-Destrutivo (END) que vem sendo aplicada nos mais diferentes tipos de ensaios desde a década de 60. No Brasil, as primeiras pesquisas em radiografia com nêutrons usando reatores como fontes de nêutrons datam do início da década de 70, sendo que somente na década de 80 é que os dispositivos radiográficos com nêutrons dos três reatores de pesquisa instalados no país passaram a ser mais amplamente utilizados. Para a elaboração desse trabalho, procurou-se realizar uma vasta pesquisa bibliográfica não apenas sobre a aplicação de técnicas de PDI a imagens produzidas por sistemas radiográficos com nêutrons, mas também sobre a própria técnica radiográfica com nêutrons. Desta forma, espera-se que esse trabalho possa servir de base tanto para futuros trabalhos acadêmicos em PDI, como também em Engenharia e Técnicas Nucleares.

A digitalização das imagens radiográficas com nêutrons, disponíveis na forma de negativos radiográficos e de positivos em papel fotográfico, foi realizada empregando-se um digitalizador de mesa (tanto para os positivos, quanto para os negativos), e uma câmara de vídeo acoplada a um *frame-grabber* (para os negativos). As imagens registradas em positivos fotográficos possuem degradações adicionais, devidas ao processo de revelação do filme radiográfico, quando comparadas com seus respectivos negativos radiográficos, o que estimula a digitalização dos negativos. Entretanto, a digitalização dos negativos radiográficos enfrenta problemas devidos à dificuldade de se

obter uma fonte de luz suficientemente intensa e homogênea, capaz de vencer a densidade óptica dos filmes radiográficos.

As imagens radiográficas com nêutrons não apresentam bordas bem definidas devido ao espalhamento que ocorre na interação dos nêutrons e dos núcleos dos materiais. Esse espalhamento prejudica a extração de contornos e dificulta a segmentação dessas imagens, principalmente quando as dimensões dos componentes a serem segmentados são próximas da resolução espacial do próprio sistema radiográfico.

Naturalmente, o sistema NEUTRA pode ter seu desempenho e sua capacidade bastante incrementados, o que certamente poderia ser objeto de outros trabalhos de pesquisa. Foram relacionadas três linhas de pesquisa que dariam continuidade ao trabalho aqui descrito: (a) migração do analisador para a plataforma *PHOTOPIX*, desenvolvida no DCC-UFMG, baseada no ambiente *Windows*, explorando os recursos da programação orientada para objetos; (b) integração das funções de captura, conversão de formatos, processamento e visualização das imagens em um único ambiente e; (c) implantação de um sistema radiográfico com nêutrons em tempo real, capaz de realizar ensaios não-destrutivos de objetos em movimento e de investigar fenômenos dinâmicos.

ANEXO A - RADIOGRAFIA COM NÊUTRONS

Uma fonte de nêutrons é a primeira consideração óbvia para qualquer um realmente interessado na produção de radiografias com nêutrons.

Harold Berger

Neste anexo, são apresentados os principais elementos constituintes de uma instalação radiográfica com nêutrons, bem como os métodos e técnicas empregados, acompanhados da formulação teórica sobre a qual são baseados. Além disso, são relacionadas as principais aplicações da radiografia com nêutrons e são discutidas as perspectivas de futuros desenvolvimentos desse método radiográfico.

Basicamente, uma instalação radiográfica com nêutrons é composta por três elementos: uma fonte de nêutrons, um conversor de nêutrons e um dispositivo para registro e visualização das imagens. As fontes de nêutrons são descritas sob a luz de conceitos como colimação de nêutrons e classificação dos nêutrons em função de sua energia. Os três principais tipos de fontes de nêutrons abordados são os aceleradores, as fontes radioisotópicas e os reatores nucleares.

Quanto à detecção dos nêutrons, é discutido o efeito direto dos nêutrons sobre emulsões fotográficas e, conseqüentemente, a necessidade de se utilizar conversores que produzam radiações secundárias, ao serem submetidos a um fluxo de nêutrons, capazes de sensibilizar um filme fotográfico. Dois tipos de conversores foram descritos de forma sucinta por apresentarem maior interesse prático: os conversores por cintilação, utilizados no *imageamento* em tempo real, e os conversores metálicos de gadolínio, amplamente empregados no *imageamento* por exposição direta através de filmes fotográficos.

Dentre as diversas técnicas de registro e visualização de imagens existentes, são descritas três técnicas que utilizam registradores do tipo tela-filme: *imageamento* por exposição direta, *imageamento* através de exposição por transferência e *imageamento* por *track-etching*, e uma técnica que emprega telas emissoras de fótons, mais conhecidas

como telas cintiladoras: o *imageamento* em tempo real. A radiografia com nêutrons é uma técnica de ensaio não-destrutivo (END) que tem sido largamente empregada em situações onde os demais métodos radiográficos não se mostram eficientes. Desta forma, a radiografia com nêutrons tem sido utilizada em ensaios nucleares, industriais, biomédicos, metalúrgicos, arqueológicos e na inspeção de explosivos.

A.1 Fontes de nêutrons

Por serem eletricamente neutros, os nêutrons ignoram a presença dos elétrons na matéria e não são afetados pelos campos eletrostáticos produzidos pela eletrosfera ou pelo núcleo. Seu grande poder de penetração deve-se, em grande parte, a essa neutralidade elétrica. A probabilidade de interação entre o nêutron e um núcleo é inversamente proporcional à energia do nêutron, que pode ser detectado apenas por meio de colisão com outras partículas. O nêutron é uma partícula instável, com uma meia-vida de aproximadamente 12 minutos, decaindo em um próton, um elétron ou uma partícula β, e um neutrino (GARRETT & BERGER, 1977). Devido a sua curta vida, o nêutron livre não existe na natureza e deve ser produzido artificialmente (VU HONG, 1971).

O feixe de nêutrons pode ser obtido a partir de um reator nuclear, de uma montagem subcrítica, de uma fonte radioativa ou de um acelerador. Os fatores a serem considerados na escolha de uma determinada fonte são: intensidade e energia dos nêutrons produzidos, intensidade e energia da radiação γ, custo, tamanho, portabilidade, blindagem e generalidade.

Uma radiação, para ser considerada adequada para fins radiológicos, deve atender aos seguintes requisitos: (a) ser suficientemente intensa para ser detectada fotograficamente, seja pelo método direto ou por meio de uma tela fluorescente; (b) ser capaz de atravessar os objetos a serem investigados, sendo absorvida diferentemente pelas diferentes partes do objeto, de forma a produzir uma imagem de bom contraste; (c) devem ser providenciados os meios de otimizar geometricamente o caminho do feixe de radiação, de forma a simular uma fonte pontual, permitindo a obtenção de imagens suficientemente nítidas; (d) o feixe de radiação não deve ser acompanhado de radiações espúrias, capazes de danificar a emulsão fotográfica, a tela fluorescente ou o objeto sob análise; (e) se houver a presença de radiações indesejadas, deve-se prover um meio de eliminá-las (KALLMANN, 1948).

A montagem utilizada para produção das primeiras radiografias com nêutrons, por Kallmann e Kuhn, em 1938, é reproduzida na FIG. 39.

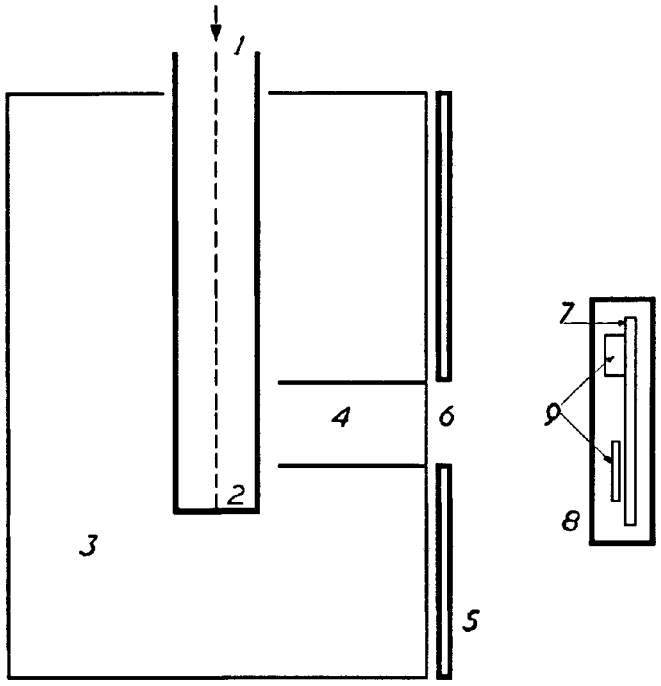


FIGURA 39 - Montagem para produção das primeiras radiografias com nêutrons, por Kallmann, em 1938. 1) raio iônico; 2) camada de reação; 3) água; 4) canal seco para saída dos nêutrons; 5) camada de boro para absorver nêutrons lentos; 6) abertura para saída de nêutrons lentos; 7) cassete contendo o sistema fotográfico; 8) tela de chumbo de blindagem dos raios-X; 9) objeto. FONTE - KALLMANN, 1948, p. 259.

A.1.1 Interação dos nêutrons com a matéria

As reações dos nêutrons com os núcleos dos materiais podem ser do tipo espalhamento elástico (n, n) ou espalhamento inelástico (n, n'), nas quais o nêutron continua existindo após cada interação, sendo desviado do feixe colimado com um certo ângulo de espalhamento. Há ainda reações de absorção, 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) (WALKER, 1975). Os nêutrons devem produzir alguma radiação secundária que seja facilmente detectável, como partículas carregadas ou fótons, pois são incapazes de sensibilizar diretamente os detectores.

As reações nucleares produzidas por partículas desprovidas de carga elétrica são responsáveis por algumas características especiais da radiografia com nêutrons:

(a) 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, possibilitando a inspeção de elementos leves, com grande seção de choque, posicionados atrás de elementos pesados com pequena seção de choque para nêutrons; (b) isótopos distintos podem apresentar seções de choque muito diferentes, assim a radiografia com nêutrons pode revelar a presença de um isótopo particular em uma amostra; (c) o comportamento ressonante da interação nêutron-núcleo faz com que a seção de choque varie abruptamente em função da energia dos nêutrons, permitindo a visualização de diferentes materiais pela alteração da energia dos nêutrons (WALKER, 1975).

As duas características determinantes das fontes de nêutrons em radiografia com nêutrons são a intensidade da fonte e o espectro de energia dos nêutrons. Essas características possuem um efeito direto sobre o tempo de exposição e sobre a eficiência na formação da imagem, estando indiretamente relacionados com a colimação do feixe, que afeta a definição da imagem. Na discussão de fontes para *imageamento* com nêutrons é importante distinguir entre fontes pontuais e fontes distribuídas (HARMS, 1977). Na radiografia com nêutrons, as seguintes propriedades do feixe de nêutrons são importantes: (a) espectro de energia dos nêutrons; (b) intensidade do feixe de nêutrons; (c) contaminação do feixe; e (d) colimação do feixe. A FIG. 40 mostra os tipos de fontes de nêutrons pontuais e distribuídas.

A.1.2 Classificação dos nêutrons

Os nêutrons, como os raios-X e os raios γ, podem ser produzidos em uma larga faixa de energias, apresentando propriedades de atenuação substancialmente diferentes para as diversas energias. A divisão dos nêutrons em grupos de energias é arbitrária, sendo que a TAB. 12 apresenta um sistema de classificação amplamente aceito (BERGER, 1965).

Geralmente, a atenuação dos nêutrons para um determinado material é apreciavelmente maior para nêutrons térmicos e epitérmicos que para nêutrons rápidos. A seção de choque, σ, expressa o poder de absorção de nêutrons apresentado pelo material, ou seja, a seção de choque representa a área-alvo oferecida pelo núcleo para um nêutron incidente, determinando a probabilidade de ocorrência de uma reação nuclear envolvendo um nêutron. A seção de choque total, σ_t, é igual à soma das seções

de choque de absorção, σ_a, e de espalhamento, σ_s. Os valores de seção de choque não são constantes, mas sim uma função da energia do nêutron incidente e da estrutura nuclear do núcleo-alvo (GARRETT & BERGER, 1977). Quanto maior a seção de choque, maior a probabilidade de um nêutron incidente ser absorvido ou espalhado. As características de atenuação dos nêutrons de diferentes energias determinam diferentes aplicações da radiografia com nêutrons. Nêutrons térmicos e epitérmicos são úteis na discriminação entre materiais. A maioria dos materiais apresenta baixa atenuação para nêutrons rápidos, assim, essa radiação é particularmente útil na inspeção de objetos espessos. Os nêutrons térmicos são os mais utilizados em radiografia com nêutrons por serem facilmente detectáveis e por apresentarem características favoráveis de atenuação. Os feixes de nêutrons contêm, usualmente, radiação γ de baixa intensidade, sendo que se o detector utilizado fôr sensível a γ, a radiografia conterá uma imagem de γ superposta à imagem com nêutrons (BERGER, 1965).

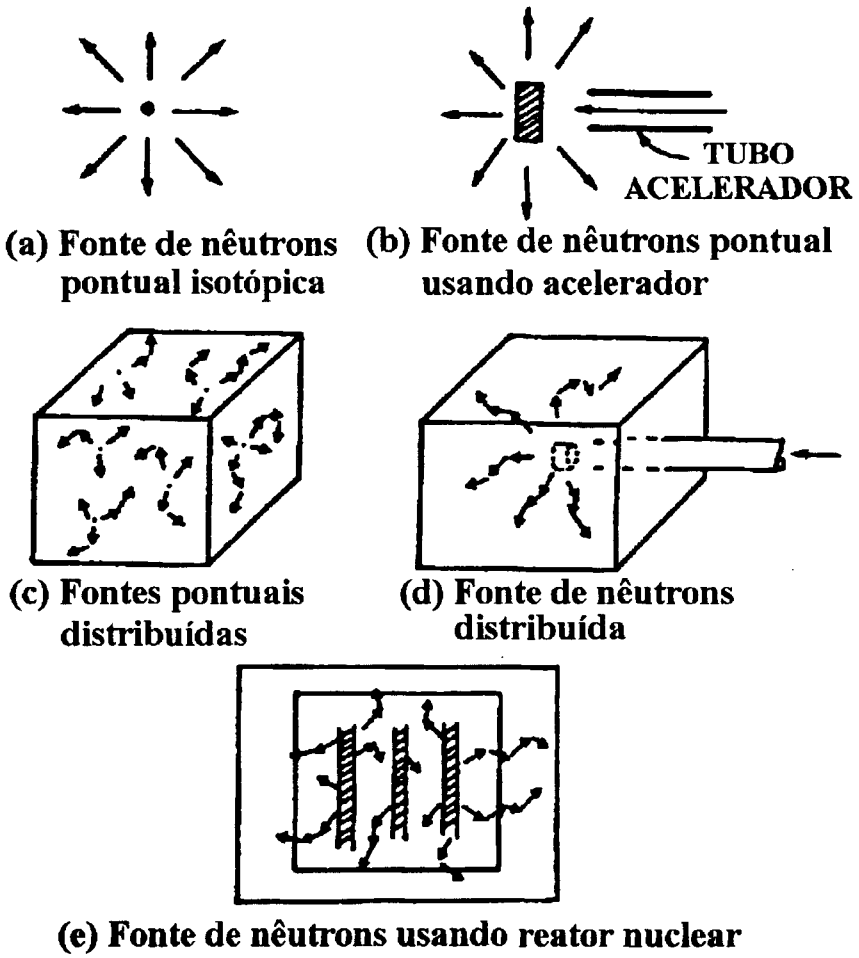


FIGURA 40 - Fontes de nêutrons pontuais e distribuídas.
FONTE - HARMS, 1977, p. 145.

TABELA 12

Classificação dos nêutrons em função da energia

TIPO	ENERGIA
Frio	< 0,01 *eV*
Térmico	0,01 a 0,3 *eV*
Epitérmico	0,3 a 10.000 *eV*
Rápido	10 keV a 20 *MeV*
Relativístico	> 20 *MeV*
Lento	0 a 10 *keV*

FONTE - BERGER, 1965, p. 10.

A.1.3 Colimação dos nêutrons

Os nêutrons rápidos emitidos por qualquer uma das fontes existentes (radioisótopos, aceleradores, montagens subcríticas e reatores nucleares) podem ser termalizados pelo envolvimento da fonte por um moderador contendo material leve, como água, óleo, plástico, parafina, berílio ou carbono. A colimação, ou seja, a retirada de um feixe de nêutrons de uma fonte de grande porte, torna-se necessária quando se realiza radiografia a partir de nêutrons térmicos porque não existem fontes pontuais de nêutrons térmicos ou de nêutrons de baixa energia. A colimação melhora a definição das imagens de radiografias de objetos espessos, entretanto, diminui a intensidade do fluxo disponível. O método mais comum de colimação consiste na retirada de um feixe divergente do interior do volume moderador, possibilitando a cobertura de uma grande área radiográfica (GARRETT & BERGER,1977).

Na FIG. 41, são representadas as configurações possíveis de dispositivos extratores de nêutrons. No reator IPR-R1, é utilizado um tubo vertical como colimador dos nêutrons, posicionado sobre o refletor de grafite que circunda o núcleo, semelhante àquele da FIG. 41(c). Para esse arranjo, 45 % do fluxo de nêutrons térmicos que alcança o plano da imagem é composto de nêutrons que penetraram pelas paredes laterais do colimador ou que foram espalhados no interior do mesmo. A importância de se providenciar uma boa colimação e um feixe de alta intensidade é ilustrada na FIG. 42, que mostra o efeito da colimação sobre a densidade óptica produzida (HARMS, 1977). Um feixe de nêutrons bem colimado, ao passar através de uma fenda estreita em um

absorvedor de nêutrons, produz uma curva de densidade óptica estreita, bem definida, na forma de sino, sobre a linha de centro da fenda, enquanto que um feixe não-colimado ou altamente espalhado não produz detalhes de densidade óptica tão agudos.

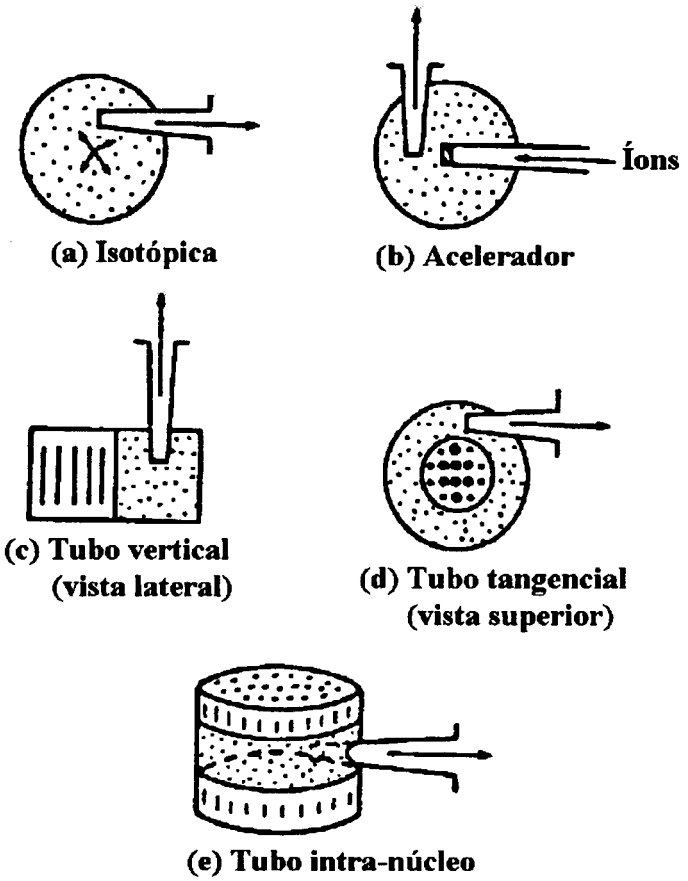


FIGURA 41 - Configurações possíveis de dispositivos extratores de nêutrons com baixa contaminação inerente. FONTE - HARMS, 1977, p. 149.

A.1.4 Aceleradores

Os aceleradores produzem nêutrons rápidos a partir da reação nuclear entre uma partícula acelerada e um núcleo-alvo. Vários tipos de aceleradores de partículas têm sido empregados com a finalidade de produzir nêutrons para uso radiográfico. Algumas das reações nucleares que ocorrem nos aceleradores são relacionadas a seguir:

$$ {}^{2}_{1}D + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 3{,}28\,MeV \qquad (43) $$

$$ {}^{3}_{1}T + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17{,}6\,MeV \qquad (44) $$

$$^{9}_{4}Be + \gamma \rightarrow 2\,^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n - 1{,}67\,MeV \quad (45)$$

$$^{9}_{4}Be + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{9}_{5}B + ^{1}_{0}n - 1{,}85\,MeV \quad (46)$$

$$^{9}_{4}Be + ^{2}_{1}D \rightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n + 4{,}35\,MeV. \quad (47)$$

Os aceleradores de partículas podem produzir nêutrons tanto para radiografia com nêutrons térmicos quanto para radiografia com nêutrons rápidos, sendo que nesse último caso apresentam as seguintes vantagens: (a) são fontes essencialmente pontuais; (b) os nêutrons rápidos apresentam um poder de penetração muito superior ao dos nêutrons térmicos para a maioria dos materiais e; (c) é possível selecionar a energia dos nêutrons produzidos (HAWKESWORTH, 1977)

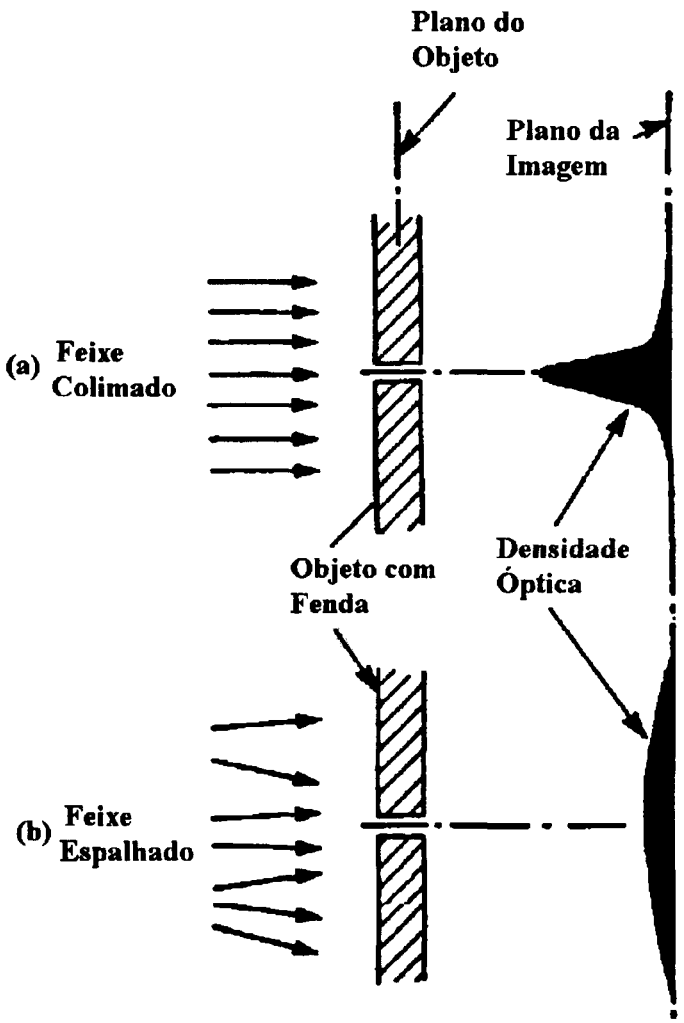


FIGURA 42 - Efeito da colimação sobre a imagem de uma fenda em um plano absorvedor de nêutrons. FONTE - HARMS, 1977, p. 150.

A.1.5 Fontes radioisotópicas

As fontes radioisotópicas contêm, tipicamente, uma concentração adequada de dois nuclídeos: um radioativo, X_r, e outro estável, Y_s. Os nêutrons são produzidos através de um processo seqüencial de dois estágios, representado por

$$\begin{aligned} X_r &\rightarrow Z_s + R \\ Y_s + R &\rightarrow n + P \end{aligned} \tag{48}$$

onde Z_s é um núcleo estável, R é um fóton de raios γ ou uma partícula α, e P é o produto nuclear resultante. O núcleo radioativo, X_r, é escolhido em função de sua meia-vida e de sua radiação emergente R, enquanto que o núcleo Y_s é escolhido por possuir uma seção de choque particularmente grande para a reação (R, n) (HARMS, 1977). Embora as fontes radioativas ofereçam as melhores condições para a construção de um dispositivo radiográfico portátil, o decréscimo de 10^5 vezes na intensidade do fluxo de nêutrons após a termalização impõe a necessidade de longos intervalos de exposição (GARRETT & BERGER, 1977). Ainda assim, há um grande interesse no desenvolvimento de fontes portáteis, empregando principalmente o isótopo ^{252}Cf.

A.1.6 Reatores nucleares

A produção de nêutrons nos reatores nucleares resulta de uma reação de fissão controlada. Para tal, são necessários uma quantidade mínima de material físsil, moderadores, refletores, fluido refrigerante e blindagens de proteção. Esses componentes tornam a instalação cara e fixa, porém capaz de produzir um alto fluxo de nêutrons: da ordem de $10^8\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ na periferia do núcleo e acima de $10^{14}\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ no núcleo do reator (VU HONG, 1971).

A.1.7 Radiografia com nêutrons térmicos

A utilização de reatores nucleares como fontes de nêutrons térmicos é vantajosa porque o alto fluxo gerado possibilita a obtenção de radiografias de alta qualidade em curtos intervalos de exposição. A maioria das pesquisas em radiografia com nêutrons tem utilizado reatores nucleares como fontes. As características desejáveis de um feixe de nêutrons térmicos para aplicações radiográficas são (a) alto fluxo de nêutrons térmicos (maior que $10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); (b) baixa intensidade de radiação γ (razão n/γ maior que $10^5\ n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$); (c) baixa intensidade de nêutrons rápidos

(razão de cádmio maior que 2,4); (d) grande área de incidência do fluxo; (e) baixa divergência angular (menor que 1,25 °) (BERGER, 1965). A TAB. 13 resume as características das principais fontes de nêutrons térmicos.

TABELA 13

Características das fontes de nêutrons térmicos

TIPO DE FONTE	INTENSIDADE RADIOGRÁFICA TÍPICA $[n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}]$	RESOLUÇÃO RADIOGRÁFICA	TEMPO MÉDIO DE EXPOSIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Radioisótopo	10^1 a 10^4	De baixa a média	Longo	Operação estável, custo de investimento médio, portabilidade possível.
Acelerador	10^3 a 10^6	Média	Médio	Operação *on-off*, custo médio, portabilidade possível.
Montagem subcrítica	10^4 a 10^6	Boa	Médio	Operação estável, custo de investimento entre médio e alto, portabilidade difícil.
Reator nuclear	10^5 a 10^8	Excelente	Curto	Operação estável, custo de investimento entre médio e alto, portabilidade difícil.

FONTE - GARRETT & BERGER, 1977, p. 132.

A.2 Detecção de nêutrons

Os nêutrons representam uma forma de radiação não-ionizante que não produz nenhum efeito significativo de formação de imagem em emulsões fotográficas convencionais ou em outros registradores de imagens. Portanto, um conversor de nêutrons deve ser utilizado (HARMS, 1977). Uma imagem com nêutrons pode ser obtida expondo-se um filme radiográfico, acoplado a um conversor, ao fluxo de nêutrons emergente de um objeto. A essa imagem será superposta uma imagem parasita de γ, proveniente da radiação γ que geralmente acompanha o feixe de nêutrons ou que é emitida pelo próprio

objeto. O conjunto conversor de nêutrons e filme radiográfico constitui um sistema de detecção. A exploração dos recursos da radiografia com nêutrons depende intimamente da disponibilidade de um sistema de detecção conveniente. Cada aplicação exige um tipo diferente de detector, em função da característica que deve ser enfatizada: definição da imagem, velocidade de resposta, resposta seletiva do detector etc. A fonte de nêutrons e o detector devem formar um conjunto indivisível cuja escolha é feita em função de parâmetros técnicos e econômicos (VU HONG, 1971). Todo sistema de detecção utilizado em radiografia com nêutrons pode ser caracterizado em função dos seguintes parâmetros: contraste, discriminação de radiação γ, resolução, rapidez e eficiência.

Contraste. O contraste mede a capacidade do detector de separar duas regiões que receberam exposições ligeiramente diferentes. Pode ser definido como a relação entre a variação da resposta do detector (variação da densidade óptica do filme radiográfico, ΔD) e a variação relativa do sinal recebido (variação do fluxo integrado de nêutrons, $\Delta\Phi/\Phi$).

Discriminação de radiação γ. A capacidade de discriminação de radiação γ é definida como sendo a dose equivalente de γ que produz o mesmo efeito de um fluxo integrado de $10^6\ n \cdot cm^{-2}$.

Resolução. A resolução é definida como a distância mínima de separação entre dois detalhes na condição de máximo contraste. Na prática, a definição de uma imagem com nêutrons é limitada não somente pela resolução inerente do sistema de detecção e pelo espalhamento dos nêutrons no interior do objeto, como também pela nebulosidade geométrica, f_g, devida à não-pontualidade da fonte de nêutrons:

$$f_g = S \cdot \frac{b}{a} \tag{49}$$

onde S = dimensão da fonte,
a = distância fonte-objeto,
b = distância objeto-detector.

Rapidez. A rapidez corresponde à velocidade com que a informação é obtida. Para sua avaliação, é preciso considerar a velocidade do processo completo.

Eficiência. A eficiência é definida pela relação entre a quantidade de informação fornecida pelo detector utilizado e o resultado teórico esperado a partir de uma mesma fonte.

Há vários métodos para se detectar nêutrons fotograficamente, destacando-se o uso de emulsões especiais, carregadas com materiais absorvedores de nêutrons, e o uso de materiais fotográficos comuns juntamente com telas conversoras. O método de detecção fotográfica mais utilizado em radiografia com nêutrons emprega filme convencional para raios-X e telas conversoras. Essas telas convertem uma imagem de nêutrons em uma imagem que pode ser detectada por um filme de raios-X. Através da tela conversora, a imagem de nêutrons é transformada em uma imagem de radiação α, β ou γ, e o processo de detecção pode ser acelerado por um fator de 50 a 100 vezes (BERGER, 1965). Os materiais tipicamente empregados em telas conversoras são apresentados na TAB. 14, juntamente com algumas características desses materiais.

A.2.1 Efeito direto dos nêutrons

Os nêutrons, desprovidos de carga elétrica, não produzem praticamente nenhum efeito direto sobre a emulsão fotográfica. Quando um filme comum é exposto diretamente a um fluxo de nêutrons térmicos, o principal efeito fotográfico obtido resulta da captura dos nêutrons pelos núcleos de prata presentes na emulsão. A emulsão fotográfica é sensível a nêutrons através das reações $^{107}Ag(n, \gamma)$ e $^{109}Ag(n, \gamma)$, mas há pouca quantidade de prata presente nas emulsões de filmes radiográficos (≈ 1 mg/cm^2) e mesmo em emulsões especiais (< 10 mg/cm^2) (HAWKESWORTH, 1977). Os isótopos ^{107}Ag e ^{109}Ag possuem seções de choque de absorção neutrônica da ordem de 44 e 113 *barns*, respectivamente (1 *barn* = 10^{-24} cm^2) e essa absorção neutrônica acarreta a emissão de radiações β e γ. Ainda assim, esse efeito é muito tênue, sendo necessário um fluxo térmico da ordem de 10^9 $n \cdot cm^{-2}$ para produzir um efeito perceptível em um filme radiográfico rápido (VU HONG, 1971).

A.2.2 Materiais conversores

As propriedades fundamentais que os conversores de nêutrons devem possuir são: (1) grande seção de choque de absorção de nêutrons e (2) capacidade de emitir uma forma adequada de radiação secundária. Os materiais conversores podem ser de dois tipos: potencialmente radioativos e de emissão imediata. Os materiais de emissão imediata, como lítio, boro, cádmio e gadolínio, possuem pouca tendência de se tornarem radioativos e emitem a radiação imediatamente após a absorção de um nêutron. Esse tipo de tela conversora é empregado no método da exposição direta, onde o filme e a tela são expostos juntos.

TABELA 14

Características dos materiais intensificadores de imagens fotográficas com nêutrons

MATE-RIAL	ISÓTO-PO	ABUN-DÂNCIA NATU-RAL [%]	SEÇÃO DE CHOQUE (1) [*barns*]	REAÇÃO (2)	MEIA-VIDA (3)
Lítio	^{6}Li	7,52	910	$^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$	Imediata
Boro	^{10}B	18,8	3.830	$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$	Imediata
Ródio	^{103}Rh	100	11 139	$^{103}Rh(n)^{104m}Rh$ $^{103}Rh(n)^{104}Rh$	4,5 *min* 42 *s*
Prata	^{107}Ag ^{109}Ag	51,35 48,65	35 2,8 91	$^{107}Ag(n)^{108}Ag$ $^{109}Ag(n)^{110m}Ag$ $^{109}Ag(n)^{110}Ag$	2,3 *min* 270 *d* 24 *s*
Cádmio	^{113}Cd	12,26	20.000	$^{113}Cd(n,\gamma)^{114}Cd$	Imediata
Índio	^{115}In	95,77	157 42	$^{115}In(n)^{116m}In$ $^{115}In(n)^{116}In$	54 *min* 14 *s*
Samário	^{149}Sm ^{152}Sm	13,8 26,8	41.000 210	$^{149}Sm(n,\gamma)^{150}Sm$ $^{152}Sm(n)^{153}Sm$	Imediata 47 *h*
Európio	^{151}Eu	...	3.000	$^{151}Eu(n)^{152m}Eu$	9,2 *h*
Gadolínio	^{155}Gd ^{157}Gd	14,73 15,68	61.000 254.000	$^{155}Gd(n,\gamma)^{156}Gd$ $^{157}Gd(n,\gamma)^{158}Gd$	Imediata Imediata
Disprósio	^{164}Dy	28,1	800 2.200	$^{164}Dy(n)^{165m}Dy$ $^{164}Dy(n)^{165}Dy$	1,25 *min* 140 *min*
Ouro	^{197}Au	100	98,8	$^{197}Au(n)^{198}Au$	2,7 *d*

FONTE - BERGER, 1965, p. 47.
NOTA - (1) Nêutrons térmicos, velocidade de 2.200 *m/s*. 1 *barn* = 10^{-24} cm^2
(2) Os estados excitados metaestáveis são indicados pela designação *m*.
(3) s = segundos, *min* = minutos, *h* = horas, *d* = dias.

Os materiais apresentados na TAB. 14 são mais adequados para detecção de imagens de nêutrons térmicos. Para detecção de nêutrons epitérmicos, os materiais mostrados na TAB. 15 são mais eficientes. Para detecção de nêutrons de energias mais elevadas, bons resultados de *imageamento* fotográfico podem ser obtidos através de

telas fluorescentes a raios-X e de cintiladores contendo alto teor de hidrogênio, conforme apontado por BERGER (1965).

TABELA 15

Detectores para nêutrons epitérmicos

MATERIAL	ENERGIA DE RESSONÂNCIA [*eV*]	ISÓTOPO	MEIA-VIDA
Índio	1,46	^{115}In	54 *min*
Ouro	4,9	^{197}Au	2,7 *dias*
Tungstênio	18,8	^{186}W	24 *h*
Lantânio	73,5	^{139}La	40 *h*
Manganês	337	^{55}Mn	2,56 *h*

FONTE - BERGER, 1965, p. 49.

A.2.3 Mecanismo de detecção

Uma câmara de nêutrons consiste basicamente de um registrador de imagens em contacto estreito com uma folha de um material que converte nêutrons em radiações secundárias, capazes de sensibilizar o registrador (HARMS, 1977). A FIG. 43 mostra uma montagem desse tipo, bem como o processo de conversão e de transporte da radiação.

Na maioria dos casos, os nêutrons emergentes do objeto são convertidos em radiações secundárias que sensibilizam os filmes fotográficos. Os conversores de nêutrons são classificados de acordo com a forma de radiação secundária emitida, que pode consistir de partículas ou de radiação eletromagnética. Os conversores consistem de folhas metálicas ou de misturas compactadas, sendo constituídos de materiais de três categorias: (a) *Conversores que emitem partículas carregadas*. É o caso do ^{6}Li, ^{10}B e do ^{235}U, para nêutrons térmicos e dos materiais hidrogenados para nêutrons rápidos. Essas partículas carregadas podem impressionar o filme fotográfico diretamente ou por intermédio de um material fluorescente. O material fluorescente mais utilizado é o sulfeto de zinco dopado com prata, ZnS(Ag); (b) *Conversores que emitem radiações γ e β*. Essa categoria compreende os materiais que, ao serem bombardeados com nêutrons, emitem

radiação γ, como o cádmio, ou elétrons de conversão interna, como o gadolínio; (c) *Conversores ativáveis*. São materiais que se tornam radioativos após a captura neutrônica, e o retorno ao estado estável ocorre por emissão de radiações β e γ (VU HONG, 1971).

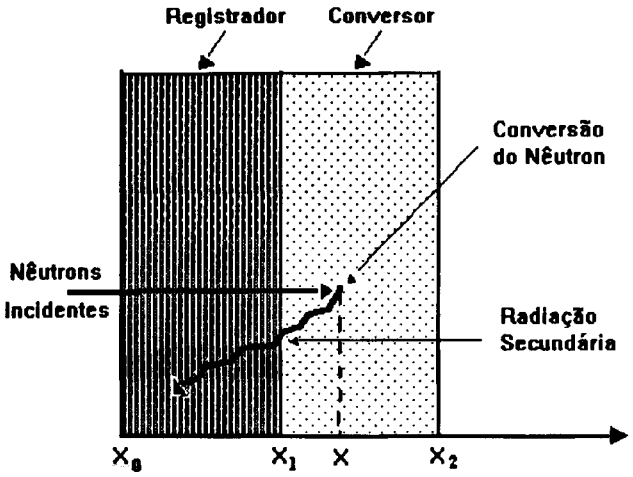
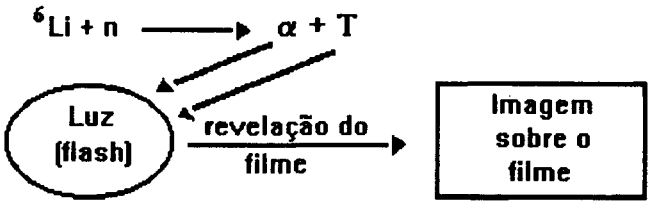


FIGURA 43 - Geometria do sistema de conversor posterior, ilustrando a conversão do nêutron e a emissão da radiação secundária. FONTE - HARMS, 1977, p. 155.

A.2.4 Conversores por cintilação

Os conversores por cintilação utilizados em radiografia com nêutrons são basicamente de duas formas: ^{6}Li e ZnS(Ag) em uma mistura granulada de material orgânico ou ^{6}Li em vidro ativado com cério. A cadeia de eventos desde a absorção dos nêutrons até a formação da imagem sobre o filme pode ser representada por:



(50)

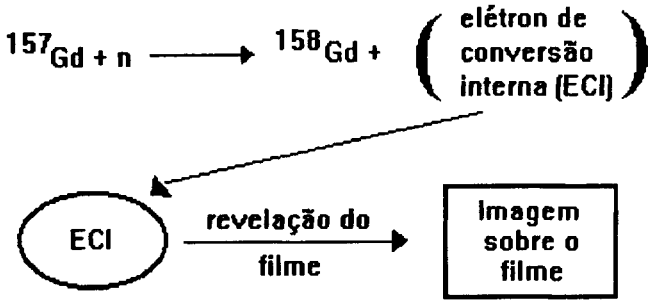
A não-homogeneidade inerente dos cintiladores tem uma tendência de produzir um efeito granulado sobre a imagem (HARMS, 1977).

Poliéster borado também tem sido usado em estudos radiográficos com nêutrons. Para nêutrons de energia superior à dos nêutrons térmicos, cintiladores vítreos de ^{6}Li, de grande espessura, são eficientes. Para nêutrons rápidos, de energia superior à

250 *KeV*, têm sido empregados cintiladores do tipo orgânico (ALIAGA-KELLY & NICOLL, 1975).

A.2.5 Conversores de gadolínio

O processo de conversão mais utilizado, por ser capaz de produzir imagens de boa qualidade, emprega folhas de gadolínio. Esse processo pode ser descrito por:



(51)

A seção de choque de captura do ^{157}Gd, de $2{,}54 \times 10^5$ *barns*, para nêutrons térmicos, é excepcionalmente alta e os elétrons de conversão interna produzidos, predominantemente de 70 *keV*, são muito eficientes na formação de uma imagem sobre a emulsão fotográfica (HARMS, 1977).

A.3 Métodos de *imageamento*

Às três categorias de materiais conversores existentes correspondem, fundamentalmente, dois métodos de *imageamento*: o método direto e o método indireto ou por transferência. O método direto utiliza os conversores que emitem radiações γ e β ou outras partículas carregadas. Nesse método, o filme é exposto simultaneamente com o conversor. Esse é um método rápido que apresenta a desvantagem de produzir uma imagem parasita, superposta à imagem de nêutrons, devido à presença de radiação γ. No método por transferência, apenas o conversor é exposto ao fluxo neutrônico, tornando-se, por conseqüência, β-radioativo. Após a irradiação e fora da área de influência da fonte de nêutrons, como em aplicações auto-radiográficas, o conversor irradiado é posto em contacto com o filme radiográfico. Esse método, insensível ao ruído de fundo devido à radiação γ, utiliza conversores ativáveis: compostos de prata, índio, disprósio ou ouro, para nêutrons térmicos; compostos de cobre, para nêutrons de energia superior a 11 *MeV*; compostos de alumínio, para nêutrons de energia superior a 2,6 *MeV* e compostos de fósforo, para nêutrons de energia superior a 1,8 *MeV* (VU HONG, 1971).

Os principais dispositivos de registro e *imageamento* da radiação emitida por conversores de nêutrons são: filme fotográfico, filme plástico gravável (*track-etching*), intensificadores eletrônicos e tubos fotomultiplicadores. A escolha do tipo de conversor a ser empregado deve ser feita a partir do estudo do desempenho de cada sistema de registro, considerando-se a intensidade do sinal em função do tempo de exposição; a eficiência no registro da imagem; a resolução espacial e a meia-vida do isótopo emissor da radiação secundária.

No exame radiográfico de materiais radioativos, não se deve registrar a radiação γ emitida pelo objeto, mas apenas os nêutrons que atravessaram esses materiais. Desta forma, um conversor que se torna radioativo após a exposição aos nêutrons ou um sistema de *track-etch* é posicionado no plano da imagem, sendo colocado em contacto com o registrador após a exposição (HARMS, 1977).

A.3.1 Registradores tela-filme

Os registradores de imagens com nêutrons mais populares são aqueles baseados em filmes fotográficos, mas como os nêutrons não produzem um efeito direto significativo sobre esses filmes, algum tipo de tela conversora deve ser empregado juntamente com o filme para aumentar a velocidade, melhorar a razão n/γ e a resolução espacial (HAWKESWORTH, 1977). Para feixes de nêutrons pouco intensos, é possível melhorar a qualidade das imagens obtidas através de um sistema tela-filme por meio do aumento do tempo de exposição. A maior desvantagem dos registradores do tipo fotográfico é a sua incapacidade de fornecer uma imagem instantânea, o que pode ser contornado com o uso de filmes do tipo *Polaroid*. Na TAB. 16, são apresentadas as propriedades de várias telas conversoras de nêutrons.

Há dois métodos de *imageamento* de radiografias com nêutrons empregando registradores tela-filme: o *imageamento* por exposição direta e o *imageamento* através de exposição por transferência. No método direto, o filme é submetido ao feixe de nêutrons durante a exposição, enquanto que no método por transferência, o filme não é exposto ao fluxo de nêutrons (BERGER, 1976). A exposição do filme ocorre através de uma auto-radiografia por uma tela metálica radioativa que transporta a imagem. Em ambos os métodos, são empregadas telas conversoras ou intensificadoras de imagens. No método direto, essas telas aumentam a resposta do detector através da emissão de uma radiação secundária capaz de sensibilizar o filme. No método indireto, as telas empregadas são constituídas de materiais que se tornam radioativos após a exposição aos nêutrons térmicos.

TABELA 16

Propriedades dos materiais usados em telas conversoras de nêutrons

MATERIAL	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE NÊUTRONS TÉRMICOS [mm^{-1}]	REAÇÃO NUCLEAR PREDOMINANTE	MEIA-VIDA DO EMISSOR DE RADIAÇÃO	TIPO E ENERGIA DA RADIAÇÃO IONIZANTE	COMPOSIÇÃO TÍPICA DA TELA
$^{6}Li_{3}$	0,90 (NE 426) (1)	(n, α)	0	α, 2,05; T, 2,74 *MeV*	^{6}LiF + ZnS, 250 *μm*
$^{10}B_{5}$	44,8 (B_4C)	(n, α)	0	α, 1,47; Li, 0,84 *MeV*	$^{10}B_4C$, 5*μm*
$^{Nat}Gd_{64}$	140,3	(n, γ)	0	ECI, 71 *keV* (principal)	folha métalica, 25 *μm*
$^{Nat}Dy_{66}$	3,01	(n, γ)	2,3 *h*	β^-, 1,28 *MeV* (máximo)	folha metálica, 100 μm
$^{Nat}In_{49}$	0,73	(n, γ)	54 *min*	β^-, 1,00 *MeV* (máximo)	folha metálica, 250 μm

FONTE - HAWKESWORTH, 1977, p. 189.
NOTA - (1) NE-426 é uma tela intensificadora para radiografia com nêutrons produzida pela *Nuclear Enterprises Ltd.*

A.3.2 Telas emissoras de fótons

As telas mais velozes são baseadas na combinação de um absorvedor de nêutrons e de um material fosforescente. Materiais que emitem partículas α após a absorção de nêutrons, como ^{6}Li e ^{10}B, são os mais utilizados devido à alta energia das partículas α geradas. A crítica mais freqüente às radiografias obtidas através de telas cristalinas ou granulares reside na granulação que apresentam, devido à natureza heterogênea das telas. Geralmente, as telas conversoras são posicionadas atrás do filme, com relação ao feixe incidente. O emprego de telas frontal e posterior faz com que a velocidade seja praticamente duplicada. A dificuldade na utilização de telas frontais reside na inexistência de telas uniformes.

A maior desvantagem das telas emissoras de fótons é a sua baixa resolução espacial. Em radiografia com nêutrons, é vantajoso possuir uma tela conversora que responda imediatamente à absorção dos nêutrons, de forma que não haja qualquer atraso entre a formação da imagem e a sua visualização. Dois metais são de grande interesse, devido às propriedades de absorção de nêutrons térmicos que apresentam, o cádmio (σ_a = 2.450 *barn*) e o gadolínio (σ_a = 49.000 *barn*). Os filmes mais adequados para serem utilizados juntamente com telas emissoras de elétrons são aqueles desenvolvidos para raios-X, uma vez que a imagem é formada por elétrons de energia semelhante. Em termos de velocidade, os filmes mais rápidos seriam, a princípio, a melhor opção. Entretanto, quanto mais lento o filme, menor a granularidade que apresenta. (HAWKES-WORTH, 1977). Algumas vezes, é preferível empregar os filmes de emulsão simples mais rápidos disponíveis comercialmente em lugar dos filmes de emulsão dupla, pois os primeiros oferecem uma melhor discriminação de radiação β. O emprego de uma tela frontal de gadolínio é muito eficiente no aumento da velocidade, sendo que uma tela de 6 μm de espessura aumenta a velocidade em 50 % e não afeta a resolução. Entretanto, essas telas frontais não têm sido empregadas devido à dificuldade de se obter telas uniformes.

Combinados com filmes rápidos sensíveis a fótons, os cintiladores produzem imagens com nêutrons térmicos submetidos a fluxos entre 10^5 a 10^6 $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. Embora a imagem do cintilador seja mais granulada, apresenta a vantagem de aceitar exposições de até quatro ordens de grandeza menores que aquelas obtidas por telas de gadolínio e filmes lentos. Cintiladores possibilitam resoluções espaciais de 50 a 100 μm. Dentre os métodos por exposição direta apresentados, os cintiladores que empregam fósforos de ZnS produzem a melhor razão n/γ.

A.3.3 *Imageamento* com nêutrons térmicos

Os métodos mais empregados para *imageamento* com nêutrons térmicos, em ordem decrescente de velocidade, são: o método direto, usando um cintilador de ZnS, ^{6}LiF (sulfeto de zinco, fluoreto de lítio); o método direto, usando um conversor metálico de gadolínio e o método indireto, utilizando um conversor de disprósio. Quanto à resolução, o gadolínio produz as imagens de melhor qualidade, vindo em seguida o método indireto e, por último, o cintilador (VU HONG, 1971). A imagem obtida através do cintilador apresenta uma baixa definição devido à difusão da luz no interior da própria tela cintiladora. A TAB. 17 apresenta as características das principais telas conversoras de nêutrons térmicos.

TABELA 17

Características de telas conversoras de nêutrons térmicos (1)

TIPO DE TELA	ESPESSURA TÍPICA [*mm*]	EFICIÊNCIA (NÊUTRONS TÉRMICOS) [%]	INDEFINIÇÃO INERENTE (MÉTODO DE KLASEN) [μm]	FILMES ADEQUADOS	RAZÃO n/γ, IMAGEM COM 90 % n/10 % γ [$n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$]
NE 421 (granular)	0,65	30	1.000	Raios-X (tela de tungstato)	5×10^4
NE 426 (granular)	0,25	20	400	Raios-X (tela de tungstato)	5×10^4
NE 905 (vítrea)	1,0	80	400	Raios-X (tela de tungstato)	2×10^5
Folha de gadolínio	0,025	25	< 100	Raios-X (tela de chumbo)	10^6
Folha de disprósio	0,10	10	200	Raios-X (tela de chumbo)	0

FONTE - HAWKESWORTH, 1977, p. 189.
NOTA - (1) Para telas posicionadas atrás do filme.

Outros métodos de *imageamento* de nêutrons térmicos incluem o contador de centelhas multi-fio (*multi-wire spark counter*), a câmara proporcional multi-fio (*multi-wire proportional chamber*), o tubo *Digicon*, a termoluminescência e a célula de gás, descritos por Berger (BERGER, 1976).

A.3.4 *Imageamento* por exposição direta

O método de *imageamento* mais amplamente utilizado em radiografia industrial com nêutrons é o *imageamento* direto usando tela de gadolínio, representado na FIG. 44. Tipicamente, tem sido empregada uma tela posterior de gadolínio de 25 μm de espessura e um filme radiográfico de emulsão simples (BERGER, 1976). Os elétrons de conversão interna, de baixa energia, emitidos pelo gadolínio após o bombardeio de nêutrons, expõem apenas a face da emulsão em contacto com o gadolínio. A eliminação da segunda emulsão (filmes de emulsão dupla) reduz apenas ligeiramente a resposta do detector a nêutrons térmicos, enquanto reduz substancialmente a resposta do detector a

componentes de radiação γ ou raios-X presentes no feixe. A intensidade típica do feixe de nêutrons, para um filme radiográfico lento e de emulsão simples, e uma tela conversora de gadolínio, é de aproximadamente $3 \times 10^9\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, podendo ser reduzido para cerca de $10^8\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, para filmes radiográficos rápidos. O emprego de telas de gadolínio tem possibilitado obter as radiografias com nêutrons de melhor resolução espacial (da ordem de 10 μm). O contraste obtido através do método direto é inferior ao do método por transferência, devido ao borramento provocado pelas radiações γ.

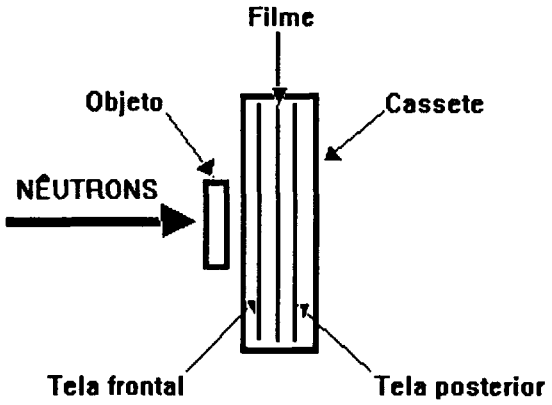


FIGURA 44 - *Imageamento* por exposição direta.

A.3.5 *Imageamento* através de exposição por transferência

O método por transferência oferece a vantagem de não submeter o filme ao feixe de nêutrons, conforme pode ser observado na FIG. 45. Dessa forma, o filme não é exposto à radiação γ proveniente de um objeto radioativo, de reações entre nêutrons e objetos na trajetória do feixe, ou de raios-X presentes no próprio feixe de nêutrons. A técnica de transferência tem sido amplamente empregada na inspeção de materiais radioativos, como combustíveis nucleares irradiados. Os materiais mais comumente utilizados como conversores em radiografias por transferência são índio (meia-vida de 54 minutos) e disprósio (meia-vida de 2,3 horas), em espessuras de 125 a 250 μm, respectivamente. Uma vez que esse método exige duas exposições, uma ao feixe de nêutrons e outra na auto-radiografia, é gasto um tempo total maior que no método direto (BERGER, 1976). Outra desvantagem deve-se à existência de um limite inferior de intensidade de nêutrons, a partir do qual o método funciona, pois a ativação e o decaimento da radioatividade dependem da meia-vida do material empregado. Há pouca atividade ou decaimento após cerca de três meias-vidas, quando 87,5 % da atividade ou decaimento total terá ocorrido.

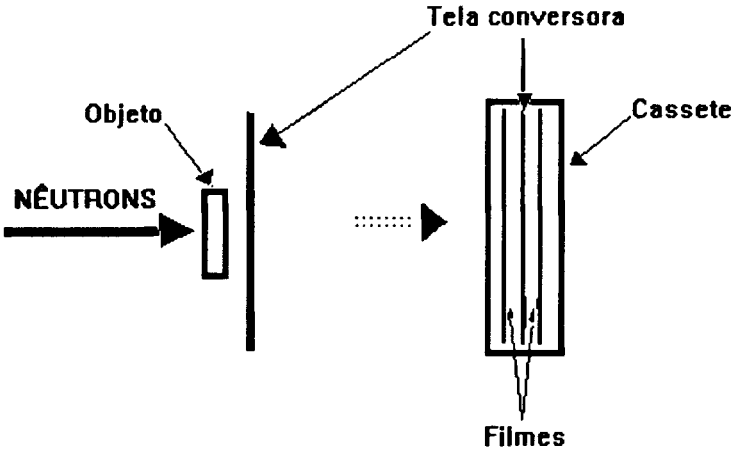


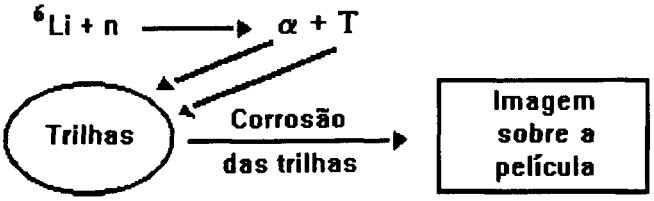
FIGURA 45 - *Imageamento* através de exposição por transferência

Mesmo utilizando filmes rápidos, fluxos de cerca de 10^4 $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ representam a intensidade mínima para o método por transferência com um material de conversão de alta seção de choque, como o disprósio. Radiografias por transferência têm sido, em grande parte, utilizadas com fontes de nêutrons intensas, como os reatores nucleares, na inspeção de materiais radioativos. Os períodos de exposição típicos para o índio são de 5 a 10 minutos e para o disprósio, de 2 a 5 minutos, utilizando um feixe de nêutrons térmicos de 10^7 $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ e um filme para raios-X de velocidade média. Essas radiografias apresentam resoluções espaciais da ordem de 50 μm. O contraste obtido por esse método é melhor que aquele obtido através do método direto porque o contraste não é prejudicado pela presença de radiação γ.

A.3.6 *Imageamento* por *track-etching*

O método de *imageamento* por *track-etching* é um método direto que apresenta a vantagem de ser insensível ao ruído de fundo produzido pela radiação γ, como o método por transferência. Além disso, esse método possui a vantagem de não ser limitado pela saturação do detector. Os nêutrons térmicos são convertidos em partículas carregadas que deixam traços registrados sobre uma película de mica, vidro ou plástico. Esses traços são posteriormente evidenciados por meio de um ataque químico. Essas películas são baratas e insensíveis à luz, suprimindo, portanto, a necessidade de serem manipuladas em câmaras escuras (VU HONG, 1971).

Nesse método, uma camada de ^6Li é colocada adjacente a uma película, como nitrato de celulose, sendo que as partículas emitidas deixam trilhas sobre essa película, visíveis através de um processo de corrosão química:



(52)

Uma vez que a camada de lítio é bastante homogênea, esse processo produz imagens bastante nítidas, apesar do fato das características ópticas das películas empregadas produzirem um contraste visual relativamente baixo (HARMS, 1977), sendo importante a utilização de fluxos integrados de nêutrons. Em virtude da discriminação total de radiações γ, o *imageamento* por *track-etching* associado com o método direto produz resultados melhores que o registro em filme fotográfico.

As vantagens do método por *track-etch* são a sua insensibilidade à luz (que facilita o seu manuseio), a resposta linear, a insensibilidade a raios-X e um tempo ilimitado para acumular uma imagem (BERGER, 1976).

A.3.7 *Imageamento* em tempo real

Na radiografia com nêutrons, bem como nas demais técnicas radiográficas, é desejável observar eventos dinâmicos ou mesmo visualizar objetos em movimento. A maioria dos sistemas radiográficos em tempo real baseia-se no uso de cintiladores de nêutrons, que emitem fótons quando irradiados com nêutrons térmicos. A luz resultante pode ser amplificada por intensificadores de luz ou detectada diretamente por câmaras de vídeo. O sistema de *imageamento* em tempo real permite a captura direta de imagens de radiografias com nêutrons, o processamento imediato e o armazenamento digital das imagens. A imagem capturada pela câmara de vídeo pode ser gravada por um VCR. Quase todas as telas descritas para *imageamento* direto foram testadas em *imageamento* eletrônico, sendo que as telas emissoras de fótons foram as que apresentaram os melhores resultados. Para obter uma imagem em tempo real, comparável àquelas obtidas através de filmes ultra-rápidos e telas de ^{6}LiF-ZnS, é necessária uma exposição de, no mínimo, 10^5 $n \cdot cm^{-2}$ durante um período de tempo compatível com o tempo de formação de imagens no olho humano, em torno de 0,1 *s*. Desta forma, a intensidade mínima do feixe deve ser de cerca de 10^6 $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. Uma vez que as lentes mais rápidas existentes são capazes de capturar somente uma fração da luz recebida por uma emulsão fotográfica, ao utilizar um sistema de vídeo para visualizar a imagem produzida por uma tela conversora, a intensidade do feixe deve ser ainda maior que

$10^6\ n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ (HAWKESWORTH, 1977). A técnica mais utilizada para *imageamento* em tempo real (FIG. 46) consiste no uso de um conjunto câmara de vídeo-conversor de imagens de alto ganho (com a câmara posicionada atrás do conversor), empregando lentes rápidas e um espelho montado a 45 °. Esse espelho é necessário para remover a câmara do feixe residual de nêutrons.

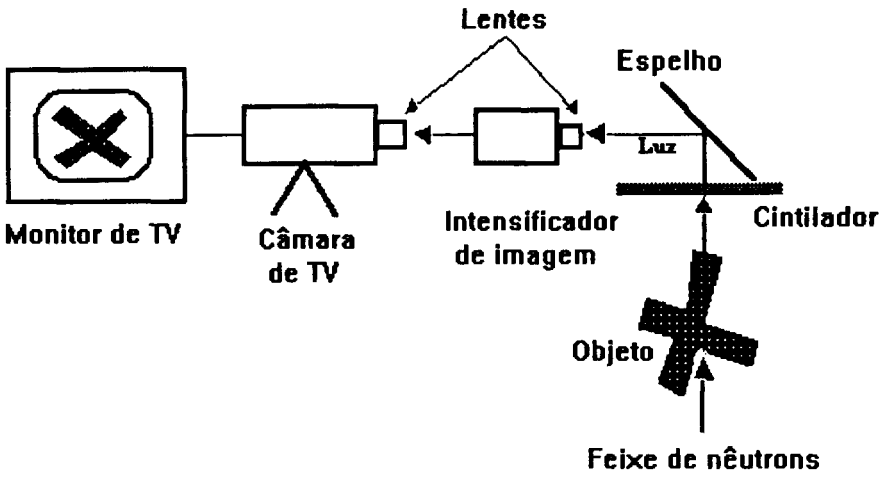


FIGURA 46 - *Imageamento* eletrônico.

A.4 Aplicações

A radiografia com nêutrons é um método extremamente eficiente em ensaios não-destrutivos (END), seja como uma técnica complementar à radiografia por raios-X ou por raios γ, seja em outras áreas especializadas, onde as diferenças de atenuação entre raios-X e nêutrons não sejam fundamentais (BERGER, 1965). O desenvolvimento de novos métodos de detecção e de novos tipos de fontes de nêutrons tem estimulado o surgimento de novas aplicações da radiografia com nêutrons.

A radiografia com nêutrons oferece poucas vantagens como uma simples substituta da radiografia por raios-X, que já é um método de END bastante desenvolvido. Por outro lado, o emprego da radiografia com nêutrons é vantajoso em problemas especiais de inspeção, onde a utilização de raios-X ou raios γ não produz resultados satisfatórios, por exemplo, na inspeção de materiais radioativos. A diferença de interação entre a matéria, os nêutrons e os raios-X ou raios γ, demonstra que os três métodos são complementares entre si. As diferenças entre os coeficientes de atenuação de nêutrons térmicos e de raios-X sugerem diversas aplicações. Na TAB. 18, encontram-

se algumas áreas de aplicação da radiografia com nêutrons relacionadas por Berger, em 1965 e que permanecem atuais ainda hoje, como pode ser observado nas aplicações relacionadas a seguir.

TABELA 18

Sugestões de áreas de aplicação para radiografia com nêutrons térmicos

ÁREA	APLICAÇÃO
Tecnologia de reatores	Verificação de homogeneidade, continuidade e teor de veneno físsil em varetas de controle;
	Verificação de falhas em materiais para blindagem de nêutrons;
	Localização de refrigerantes e resíduos orgânicos em tubulações metálicas;
	Inspeção de elementos combustíveis;
	Estudo de inclusões em metais.
Tecnologia de mísseis e foguetes	Verificação de fraturas e trincas em combustíveis sólidos;
	Inspeção de componentes plásticos ou de borracha em fuselagens;
	Verificação do posicionamento de juntas orgânicas ou de borracha em montagens metálicas.
Geral	Estudo de amostras biológicas pouco espessas;
	Verificação de falhas e defeitos em materiais plásticos;
	Inspeção de chapas de cádmio;
	Difusão de metais em semicondutores;
	Inspeção de buchas de vedação em sistemas pressurizados ou a vácuo.

FONTE - BERGER, 1965, p. 114.

A.4.1 Aplicações nucleares

Medição de diâmetros de pastilhas combustíveis; identificação isotópica; verificação de queima de materiais irradiados; inspeção de componentes de blindagem; discriminação de diferentes concentrações de isótopos de um mesmo elemento etc.

Inspeção de elementos combustíveis irradiados. O exame periódico de elementos combustíveis de reatores nucleares, submetidos a períodos conhecidos de irradiação, é essencial no desenvolvimento dos materiais empregados na fabricação desses combustíveis. A inspeção não-destrutiva desses materiais deve ser capaz de revelar alterações dimensionais e defeitos, bem como a localização de termopares e outros dispositivos em elementos combustíveis. A resolução e o contraste obtidos pela radiografia com nêutrons são comparáveis àqueles obtidos pela radiografia por raios-X, com a vantagem de não ser afetada pelo grau de atividade do objeto sob teste e de permitir o *imageamento* em tempo real, possibilitando a realização de medições dimensionais (BERGER & BECK, 1963).

A técnica radiográfica com nêutrons é uma importante ferramenta na realização de ensaios não-destrutivos, com o objetivo de pesquisar e desenvolver combustíveis para reatores nucleares. No *Battelle Memorial Institute*, em Columbus, EUA, as radiografias foram obtidas utilizando uma técnica em que as amostras altamente radioativas eram desembaladas, radiografadas no *Battelle Research Reactor* (BBR) e reembaladas, sendo que todas as operações foram realizadas sob a água, utilizando a piscina do reator como blindagem biológica. A inspeção de elementos combustíveis irradiados através da radiografia com nêutrons permite obter as seguintes informações: padrão de queima, distribuição de venenos nucleares, homogeneidade do combustível e variações de densidade (CARBIENER, 1966).

Determinação do padrão de queima de cádmio em varetas de controle de reatores nucleares. O controle de reatores nucleares é, freqüentemente, realizado através de varetas de controle móveis contendo cádmio. Para isto, é utilizada uma mistura isotópica natural de cádmio, sendo que a reação de controle envolve apenas o isótopo ^{113}Cd, de alta seção de choque. Quando as varetas de controle são submetidas a um fluxo intenso de nêutrons, a maior parte do ^{113}Cd é convertida em isótopos de baixa seção de choque, fazendo com que as varetas se tornem menos eficientes no controle do reator. O método radiográfico pode ser utilizado para levantar a curva de absorção de um feixe de nêutrons térmicos pelo material que compõe as varetas de controle. Os resultados obtidos são comparáveis àqueles que empregam análises químicas ou espectrometria de massa, com a vantagem de fornecer um diagrama detalhado do padrão de queima ao longo das varetas, enquanto que aqueles métodos permitem o exame apenas de áreas específicas do material (BERGER *et al.*, 1964).

Inspeção de materiais de números atômicos próximos ou de isótopos diferentes de um mesmo elemento. Se um núcleo A possui uma estrutura nuclear estável, que apresenta uma baixa probabilidade de interação com os nêutrons, o núcleo (A - 1) possuirá uma grande probabilidade de capturar um nêutron que passa pela sua vizinhança para atingir a estrutura estável do núcleo A (VU HONG, 1971).

Inspeção de materiais altamente absorvedores de nêutrons. A radiografia com nêutrons produz uma imagem de melhor contraste que a radiografia por raios-X em ensaios de blindagens neutrônicas, de espaçadores de cádmio em chapas metálicas, de juntas de índio e de materiais hidrogenados (VU HONG, 1971).

Inspeção de materiais de elevado número atômico. Os materiais de elevado número atômico possuem altos coeficientes de atenuação para raios-X e raios γ, sendo, em sua grande maioria, transparentes a nêutrons térmicos. Assim, materiais densos, como chumbo, bismuto e urânio, para os quais os raios-X apresentam baixo poder de penetração, podem ser examinados com nêutrons, que apresentam elevado poder de penetração e baixo fator de espalhamento nesses materiais (BARTON, 1976). Essas características permitem a inspeção de blindagens neutrônicas de chumbo e de urânio natural.

Inspeção de combustíveis nucleares não-irradiados. As informações tipicamente obtidas através de radiografias com nêutrons de combustíveis nucleares antes de serem irradiados são: (a) comprimento da coluna de pastilhas combustíveis e os diâmetros dessas pastilhas. Essas medidas são posteriormente comparadas com aquelas obtidas após a irradiação, de forma que a dilatação (ou inchamento) ou a contração das pastilhas possa ser analisada em função da queima do combustível, da taxa de aquecimento a que foi submetida etc.; (b) homogeneidade e grau de enriquecimento do plutônio presente nas pastilhas combustíveis, possibilitando a determinação do conteúdo físsil e da uniformidade do elemento combustível (ROSS, 1977).

Exames de pós-irradiação em experimentos nucleares. Medição do conteúdo de ^{235}U em combustível nuclear enriquecido e detecção de fendas e cisalhamentos em pastilhas combustíveis.

Inspeção de blindagens neutrônicas. Detecção de vazios ou falhas que permitam a fuga de nêutrons através da blindagem.

A.4.2 Aplicações industriais

Identificação de materiais bloqueando os canais de refrigeração de lâminas de turbinas; verificação da presença de óleo solidificado e graxa em canais de lubrificação de componentes de aeronaves; inspeção de juntas de resina de epóxi em rodas de automóveis de corrida; inspeção de hélices de helicópteros; inspeção de juntas soldadas; inspeção de circuitos impressos; inspeção de mangueiras de borracha etc.

Estudo da distribuição de um elemento altamente absorvedor de nêutrons em uma amostra. Um elemento altamente absorvedor de nêutrons pode ser utilizado como um agente de contraste para detectar fissuras estreitas ou cavidades pequenas na superfície de uma peça. A distribuição desse elemento sobre a peça radiografada permite a localização daqueles defeitos (VU HONG, 1971).

Inspeção de um material hidrogenado oculto por um material denso. Os materiais hidrogenados atenuam fortemente os feixes de nêutrons térmicos (pelo fenômeno de difusão e não pelo de captura) que, por sua vez, atravessam mais facilmente os materiais densos como chumbo, aço e cobre (VU HONG, 1971). Essa propriedade possibilita aplicações bastante específicas da radiografia com nêutrons:

- Exame de sanduíches plástico-metal;
- Verificação da distribuição de um adesivo hidrogenado entre duas folhas metálicas;
- Ensaio do estado e da localização de juntas em montagens mecânicas;
- Verificação de cabos elétricos em volumes cimentados;
- Inspeção de líquidos hidrogenados em reservatórios ou em tubulações;
- Inspeção de combustíveis sólidos contidos em invólucros metálicos;
- Detecção de inclusões de hidrogênio em metais (importante na inspeção de soldas);
- Detecção da presença de óleos e graxas;
- Detecção de defeitos em interfaces metal-borracha;
- Localização de *O-rings* e componentes plásticos.

Inspeção de peças através de líquidos contrastantes. Os agentes contrastantes são substâncias que, por possuírem grande seção de choque de absorção ou de espalhamento, são capazes de melhorar a discriminação em radiografias com nêutrons, como água, óxido de gadolínio, ácido bórico, parafina e álcool. Esses agentes

contrastantes são usados para impregnação de materiais para detecção de áreas de alta porosidade, recobrimento de objetos e preenchimento de cavidades metálicas para obter melhor definição (FUGA,1984).

Falhas em adesivos. A radiografia com nêutrons permite detectar falhas na interface entre adesivos e peças metálicas e verificar a uniformidade da espessura do adesivo.

Inspeção de ligas de materiais com números atômicos próximos. Materiais com números atômicos vizinhos possuem coeficientes de atenuação para raios-X e raios γ muito próximos entre si, portanto essas radiações não produzem radiografias de bom contraste nem boa definição na interface entre as ligas. Para nêutrons térmicos, esses coeficientes de atenuação podem ser bastante distintos, permitindo a obtenção de um bom contraste nas interfaces (FUGA, 1984).

Estudo da dinâmica de fluidos em tubulações metálicas. A visualização dos fluxos através de radiografia com nêutrons requer o uso tanto de fluidos transparentes a nêutrons como de fluidos altamente absorvedores de nêutrons. A maior dificuldade desta aplicação consiste em encontrar fluidos transparentes a nêutrons térmicos, uma vez que a maioria dos fluidos existentes contém hidrogênio (CIMBALA *et al.*, 1988).

Determinação quantitativa de densidades de materiais através da medição do grau de atenuação dos nêutrons (McRAE *et al.*,1986).

Estudos sobre cavitação e entupimento em injetores de combustível usados em turbinas a jato (LINDSAY *et al.*, 1986).

Estudos sobre o transporte de água em solos, com a finalidade de desenvolver um modelo matemático para descrever esse fenômeno (LINDSAY *et al.*, 1986).

Estudo de fluxos bifásicos gás-líquido em tubulações metálicas (MISHIMA *et al.*, 1989).

Detecção de infiltração de fluidos em peças submetidas a altas pressões de água ou líquidos orgânicos.

Inspeção de componentes eletrônicos.

A.4.3 Aplicações biomédicas

A radiografia com nêutrons térmicos *in vivo* é restringida pelo baixo poder de penetração dos nêutrons térmicos em tecidos hidrogenados. Duas áreas que têm atraído grande interesse são o estudo da formação de tecidos moles no interior de tecidos ósseos e o estudo das taxas de absorção de D_2O (deutério). Em aplicações médicas, a radiografia com nêutrons térmicos tem sido experimentada sem êxito, devido à limitação das espessuras de hidrogênio que podem ser investigadas, à grande dose de radiação a que ficaria exposto o paciente e à baixa resolução resultante, causada pela difusão no interior do objeto sob análise (BARTON, 1976).

A.4.4 Aplicações metalúrgicas

Em Metalurgia, a radiografia com nêutrons tem sido empregada de duas formas principais: (a) como um método radiográfico de alta resolução, capaz de investigar quantitativa e qualitativamente as microestruturas e a composição de amostras metalúrgicas. Em analogia com a microrradiografia por raios-X, as técnicas de *imageamento* com nêutrons de alta resolução podem ser chamadas de microneutrongrafia; (b) como um método *defectoscópico*, capaz de detectar, em escala macroscópica, defeitos e falhas devidos a imperfeições dos processos metalúrgicos (RANT & ILIC, 1977).

A.4.5 Aplicações arqueológicas

Inspeção de fragmentos de cerâmica; inspeção de armaduras medievais; inspeção de pontas de lança romanas; inspeção de moldes de barro da idade do bronze (MATFIELD, 1975), exames de esqueletos fósseis, objetos petrificados e fósseis marinhos; e inspeção do interior de peças metálicas seladas.

A.4.6 Inspeção de explosivos

Ensaios qualitativos e quantitativos e de localização de materiais explosivos, ensaio de homogeneidade de cargas explosivas, detecção de migração entre explosivos de diferentes composições, detecção de umidade em explosivos, detecção de falhas (*gaps*) na interface entre diferentes tipos de materiais explosivos, inspeção de detonadores e inspeção de propelentes de foguetes.

A.5 Perspectivas

Atualmente, a radiografia com nêutrons pode ser considerada uma técnica de END bastante madura, que tem sido utilizada em situações bastante específicas, não sendo mais considerada simplesmente como um método de ensaio complementar às técnicas radiográficas por raios-X e raios γ. Entretanto, para ampliar ainda mais a sua gama de aplicações, são necessários alguns aperfeiçoamentos nos dispositivos e nas técnicas radiográficas com nêutrons, o que tem mobilizado pesquisadores e instituições de pesquisa de todo o mundo.

Pode-se afirmar que os principais avanços esperados para os próximos anos são: (a) desenvolvimento de fontes portáteis de nêutrons térmicos, capazes de produzir fluxos de nêutrons suficientes para viabilizar a realização de ensaios radiográficos *off-the-shelf*; (b) desenvolvimento de conversores de nêutrons de alta eficiência e resolução, imunes à radiação γ, adequados para o *imageamento* em tempo real; (c) desenvolvimento de técnicas de *imageamento* em tempo real capazes de produzir radiografias de qualidade comparável àquelas obtidas através dos métodos fotográficos; (d) desenvolvimento de sistemas radiográficos que utilizem nêutrons lentos, epitérmicos e rápidos, cobrindo aplicações ainda não exploradas pelas demais técnicas radiográficas de ensaio; e (e) aperfeiçoamento dos sistemas de captura, processamento e análise de imagens radiográficas com nêutrons. A seguir, são listados alguns desenvolvimentos sugeridos por diversos pesquisadores.

Desenvolvimento de novas fontes de nêutrons, como reatores de pequeno porte, montagens subcríticas, fontes radioisotópicas e aceleradores (BERGER, 1986). Para medir a área interfacial entre duas fases de fluxos bifásicos através de *imageamento* em tempo real, é preciso melhorar a qualidade das imagens disponíveis atualmente, seja através do uso de fontes pulsadas de nêutrons ou de fontes mais intensas, seja desenvolvendo conversores fluorescentes de maior sensibilidade (MISHIMA *et al.*, 1989).

Desenvolvimento de telas cintiladoras mais eficientes, envolvendo o estudo dos seguintes aspectos: (a) determinação da razão absorvedor/fósforo que otimiza a resolução e a velocidade das telas cintiladoras; (b) utilização de fósforos mais lentos em inspeções que exijam alta resolução ou em situações de baixo fluxo de nêutrons e baixa resolução inerente, onde seja tolerável a redução da granularidade da imagem; (c) laminação do absorvedor e do fósforo, em lugar de dispersão do absorvedor por todo o fósforo, com a finalidade de obter melhor resolução para os α-emissores; (d) aplicação

de processamento digital às imagens radiográficas, para compensar a baixa velocidade das telas de alta resolução; e (e) uso de isótopos enriquecidos na construção das telas, para aumentar a velocidade das mesmas (LINDSAY *et al.*, 1983).

Desenvolvimento de cintiladores mais sensíveis, p. ex. conversores de BN + ZnS(Ag), a fim de obter imagens de melhor qualidade, que, por sua vez, dependem consideravelmente da sensibilidade do detector (FUJINE *et al.*, 1983).

Sistemas em tempo real. A implementação de sistemas de *imageamento* em tempo real de alta resolução está condicionada ao desenvolvimento de conversores de nêutrons mais avançados que os existentes atualmente (FUJINE *et al.*, 1985). Em termos de *imageamento* em tempo real, aguarda-se o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de sinais, o uso de detectores em tempo real juntamente com fontes de nêutrons portáteis, desenvolvimento de *Digital Signal Processors* (DSP - processador de sinais digitais) que incorporem técnicas como média de quadros, filtragem de ruído de fundo, melhoria de contraste e subtração de imagens, de forma a realizar um pré-processamento diretamente pelo *hardware* (BERGER, 1986).

Sistemas de processamento de imagens. Espera-se que o desenvolvimento de digitalizadores de filmes radiográficos de alta resolução, aliado à utilização de técnicas de processamento de imagens, tornem mais fácil a remoção de ruído e a realização de medidas dimensionais com maior precisão (GADE-NIELSEN & OLSEN, 1983). Utilização de câmaras de vídeo com lentes para ampliação (*zoom*) ou lentes de menor comprimento focal permitem a visualização de pequenos detalhes das imagens (FUJINE *et al.*, 1983). Utilização de monitores de alta resolução e de dispositivos de armazenamento de alta capacidade, de forma a permitir a reprodução de pequenos detalhes presentes nas imagens (FUJINE *et al.*, 1983). Desenvolvimento de sistemas de armazenamento utilizando discos ópticos, a fim de permitir o registro de seqüências de imagens (FUJINE *et al.*, 1983).

Métodos de imageamento. Os dois métodos radiográficos com nêutrons que têm recebido maior atenção em P&D são a tomografia e o *imageamento* eletrônico, dinâmico, em tempo real (BERGER, 1986). É bastante promissora a pesquisa em sistemas radiográficos com nêutrons de outras energias, além daqueles que empregam nêutrons térmicos, que constituem a grande maioria dos sistemas em operação (BERGER, 1986). As aplicações tomográficas incluem os estudos teóricos e a reconstrução das imagens a partir de projeções obtidas por registros em filme ou por *imageamento* em tempo real (BERGER, 1986).

A.6 Conclusões

Tipicamente, uma instalação radiográfica com nêutrons é composta por uma fonte de nêutrons, um conversor de nêutrons e um dispositivo para registro e visualização de imagens. Este anexo descreveu cada um desses elementos, relacionando, ainda, as principais aplicações da radiografia com nêutrons e as perspectivas de desenvolvimento dessa técnica de END.

Em função das características da instalação radiográfica com nêutrons dos reatores IPR-R1 e Argonauta, dentre os diversos conceitos apresentados, os que despertam maior interesse são a utilização de reatores nucleares como fontes de nêutrons térmicos e o emprego de conversores de gadolínio e por cintilação, para *imageamento* por exposição direta e para *imageamento* em tempo real, respectivamente.

A radiografia com nêutrons é uma técnica de END que vem sendo largamente empregada em inspeções nucleares, industriais, biomédicas, metalúrgicas, arqueológicas e de explosivos. Os principais desenvolvimentos esperados para aperfeiçoar essa técnica são: disponibilidade de fontes portáteis de nêutrons, conversores de nêutrons mais eficientes e sistemas de *imageamento* e de processamento de imagens de alto desempenho.

GLOSSÁRIO

Água leve: (*Light water*) É a água comum (H_2O), distinguindo-se da água pesada (D_2O).

α-emissor: (*Alpha emitter*) Um radionuclídeo que se desintegra por meio da emissão de uma partícula α.

Auto-radiografia: (*Autoradiography*) Um registro fotográfico da radiação de um material radioativo presente em um objeto, através da sensibilização do filme radiográfico pelo próprio objeto.

β-emissor: (*Beta emitter*) Um radionuclídeo que se desintegra através da emissão de uma partícula β.

Blindagem: (*Shielding*) Parede ou escudo de proteção contra emanações de materiais radioativos.

Câmara CCD: (*CCD camera*) Câmara de vídeo contendo *Charged-Coupled Device* (CCD - dispositivo acoplado por cargas), que é um sensor de luz a semicondutores.

Captura radiativa: (*Capture*) O processo de absorção de uma partícula incidente (após a colisão) pelo núcleo atômico.

Cavitação: (*Cavitation*) A formação de cavidades locais em um líquido quando sua pressão é reduzida devido ao movimento de um corpo através do fluido.

Ceramografia: (*Ceramography*) Estudo de cerâmicas e louças antigas.

Cintilador: (*Cintillator*) Um material que emite fótons ópticos em resposta a uma radiação ionizante. As cinco principais classes de materiais cintiladores são: (a) cristais inorgânicos, como iodeto de sódio, cristais de tálio e telas de sulfeto de zinco dopadas com prata; (b) cristais orgânicos; (c) cintiladores líquidos, plásticos ou vítreos; (d) cintiladores gasosos; (e) cintiladores de Cerenkov.

Colimação: (*Collimation*) O processo de tornar paralelo um feixe de raios luminosos, um feixe de elétrons ou um feixe de outras partículas quaisquer.

Contraste: (*Contrast*) *Telec.* Grau de diferença de tonalidade entre as regiões mais claras e as regiões mais escuras em uma imagem. *Ciênc. Comput.* Diferença em cor, refletância ou sombreamento entre duas regiões de uma imagem.

Decaimento radioativo: (*Radioactive decay*) A propriedade de alguns átomos de se desintegrarem espontaneamente, emitindo uma partícula carregada e ou uma radiação γ. A taxa de decaimento radioativo não é afetada por mudanças de temperatura, campos elétricos ou magnéticos ou por processos físicos.

Densidade óptica: (*Optical density*) Densidade de transmissão fotográfica (*Photographic transmission density*). Corresponde ao logaritmo decimal da opacidade. Um filme que transmite 100 % da luz incidente possui densidade nula, enquanto que um filme que transmite 10 % da luz incidente possui densidade igual a um.

Deuteração: (*Deuteration*) Processo de transformação do hidrogênio ($^1H_1$, núcleo composto por um próton) no isótopo deutério ($^2H_1$, núcleo composto por um próton e um nêutron).

Deutério: (*Deuterium*) Hidrogênio pesado, assim denominado por possuir uma massa duas vezes maior do que a do hidrogênio comum. Símbolo: D.

Escala térmica: (*Thermal scale*) Esquema de programação da *look-up table*, utilizado em pseudocoloração, que corresponde a uma escala de cores que vai do vermelho (cor quente) até o azul (cor fria).

Espalhamento Compton: (*Compton scattering*) Efeito Compton (*Compton effect*) O espalhamento elástico de elétrons pela ação de fótons. Uma vez que a energia total e o momento total são conservados nas colisões, o comprimento de onda da radiação espalhada é modificado em função do ângulo de espalhamento, e parte da energia do fóton é transferida para os elétrons.

Espectrômetro de massa: (*Mass spectrometer*) Um espectrômetro projetado para analisar uma substância em termos das razões de massa de seus componentes. Campos elétricos e campos magnéticos são utilizados para desviar os íons da substância e para focalizar cada componente sobre um eletrodo de saída, com a finalidade de efetuar a detecção e a medição.

Esperança matemática: (*Mathematical expectation*) *Estat.* A média de uma função de uma variável aleatória sobre uma distribuição desta variável.

Estereoscópico: (*Stereoscopic*) Relativo a imagens tridimensionais.

Feixe monocromático de nêutrons: (*Monochromatic neutron beam*) Feixe composto por nêutrons de uma única faixa de energias; p. ex. nêutrons térmicos, nêutrons epitérmicos etc.

Fotodesintegração: (*Photo disintegration*) A desintegração de um núcleo atômico por uma energia radiante.

Frame grabber: Dispositivo que lê uma imagem capturada por uma câmara de vídeo e a converte para a forma digital.

Freqüência espacial: (*Spatial frequency*) Taxa de mudança da intensidade dos *pixels* em uma imagem. Geralmente, corresponde a uma grandeza bidimensional com componentes verticais e horizontais.

Halóide: (*Halide*) Composto químico que contém um elemento halógeno, como flúor, cloro, bromo ou índio.

Hardware: (1) O equipamento físico ou dispositivos mecânicos, elétricos ou eletrônicos que constituem um sistema computacional. (2) Suporte físico, componentes físicos e equipamentos periféricos que compõem a porção física de um computador.

Imageamento: (*Imaging*) Termo técnico referente à visualização de imagens.

Imagem monocromática: (*Monochrome image*) Imagem representada em tons de uma única cor.

Isótopo: (*Isotope*) Átomos do mesmo elemento químico e de massas diferentes. Contêm o mesmo número de prótons em seu núcleo, diferindo no número de nêutrons.

Laminografia: (*Laminography*) Tomografia.

Lei de Lambert-Beer-Bouguer: (*Lambert-Beer-Bouguer law*) Expressa a absorção da luz incidente por um dado material, correspondendo a

$$I = I_1 \cdot e^{-\alpha x} \tag{53}$$

onde I é a intensidade da luz a uma distância x do material, I_1 é a intensidade na superfície frontal do material e α é o coeficiente de absorção do material.

Look-up table: Tabela de mapeamento da paleta de cores de uma imagem digital.

Luminância: (*Luminance*) Brilho ou porção em preto e branco de um sinal de vídeo.

Mainframe: (1) Sistema de computação de grande porte, caracterizado por sua alta velocidade de processamento e capacidade de armazenamento. (2) O processador central de um sistema computacional. Abrange a memória principal, a unidade lógico-aritmética e os registradores especiais. (3) Sistema computacional, excluindo-se as unidades de entrada e saída, as unidades periféricas e as unidades de armazenamento intermediário.

Meia-vida: (*Half life*) O período de tempo requerido para que metade dos átomos de um radioisótopo se desintegre.

Método defectoscópico: (*Defectoscopic method*) Método de END que investiga a existência de defeitos no objeto sob análise.

Moderador: (*Moderator*) O material usado num reator nuclear para reduzir a energia dos nêutrons através de colisões sucessivas, transformando-os em nêutrons de baixa energia.

Montagem subcrítica: (*Subcritical assembly*) Instalação que apresenta uma constante efetiva de multiplicação menor que um, de forma que não se pode manter uma reação em cadeia auto-suportada, como em um reator nuclear.

Mouse: Dispositivo de entrada de dados conectado a microcomputadores destinado a substituir funções de teclado.

Neutrônica: (*Neutronics*) Ramo da Física Nuclear que se dedica ao estudo dos nêutrons.

Nuclídeo: (*Nuclide*) Uma espécie atômica de número atômico e de massa únicos.

Off-the-shelf: Disponível para uso imediato.

Orthicon: Uma câmara de tubo em que um feixe de elétrons de baixa velocidade varre um mosaico fotoemissivo, capaz de armazenar um padrão de cargas elétricas.

O-ring: Anel de vedação.

Overlay: Sobreposição. Uma técnica de transferência de rotinas de um meio de armazenamento qualquer para um outro de alta velocidade durante um processamento, de forma que várias rotinas ocupem o mesmo local de armazenamento em tempos diferentes. A sobreposição é geralmente utilizada quando a memória central está sobrecarregada e sobra apenas uma pequena área para se trabalhar com várias rotinas.

Pixel: Forma abreviada da expressão inglesa *picture element*, ou seja, elemento de imagem. Um *pixel* corresponde a cada um dos pontos que formam uma imagem digital, sendo caracterizado por sua posição na imagem e por ser valor.

Polaroid: Marca registrada da *Polaroid Corp*. Espécie de película plástica, composta de moléculas paralelas, capaz de polarizar um feixe de luz comum.

Quantização: (*Quantization*) Processo de mapear o brilho e ou as cores de uma imagem em valores inteiros.

Radiação ionizante: (*Ionizing radiation*) (1) Partículas ou fótons que possuem energia suficiente para produzir ionização diretamente ao atravessar o ar. (2) Partículas capazes de produzirem interações nucleares que liberam energia suficiente para causar ionização.

Radioisótopo: (*Radioisotope*) Um isótopo radioativo produzido artificialmente. Muitos elementos possuem até dez radioisótopos, que podem ser produzidos por ciclotron ou por bombardeamento de nêutrons em um reator nuclear. Os radioisótopos são largamente empregados na indústria, em medicina e em outras áreas, como traçadores radioativos e como fontes de radiações ionizantes.

Radioscopia: (*Radioscopy*) Técnica de inspeção radiográfica que emprega uma tela fluorescente.

Razão de aspecto: (*Aspect ratio*) Expressa a relação entre a largura e altura dos *pixels* que compõem uma imagem.

Razão de cádmio: (*Cadmium ratio*) A razão entre a atividade saturada induzida por um nêutron em uma lâmina não blindada e a atividade saturada da mesma lâmina coberta com cádmio.

Razão sinal/ruído: (*Signal-to-noise ratio*) Razão entre o nível do sinal (informação) e o nível do ruído.

Resolução espacial: (*Spatial resolution*) Densidade dos pontos em uma imagem.

Scanner: Dispositivo capaz de capturar imagens, convertendo os tons de cinza ou cores de uma imagem para a forma digital.

Seção de choque: (*Cross section*) A probabilidade, por unidade de fluxo e por unidade de tempo, de uma reação de captura ou de ionização ocorrer em um reator nuclear. A seção de choque de um átomo ou núcleo corresponde a uma área e é, de fato, a área-alvo efetiva apresentada a uma reação específica por uma partícula ou por um fóton incidente. Se a reação não ocorre, a seção de choque é nula. Uma unidade de área comumente utilizada para seções de choque é o *barn*, que equivale a $10^{-24}\ cm^2$.

Software: (1) A totalidade de programas e rotinas empregadas em um sistema computacional, como compiladores, montadores, editores etc. (2) Num sentido lato, *software* é uma expressão que se utiliza em oposição a *hardware*, para referir-se aos programas executados por um sistema computacional.

Termalização: (*Thermalization*) Diminuição da energia dos nêutrons, através de repetidas colisões com outras partículas, até que possuam aproximadamente a mesma energia cinética dos nêutrons térmicos.

Termoluminescência: (*Thermoluminescence*) Luminescência produzida em um material moderadamente aquecido.

Tomografia: (*Tomography*) Laminografia. Técnica de registro de imagens internas de uma camada específica de um corpo ou objeto. Consiste na detecção da radiação transmitida através de uma seção do objeto, deslocando-se a fonte emissora de radiação em movimento circular, permanecendo o eixo do feixe de radiação no mesmo plano. Essa técnica é conhecida também como planigrafia e estratigrafia.

Tomografia computadorizada por transmissão: (*Computer tomography by transmission*) Consiste na reconstrução da distribuição espacial das propriedades dos materiais que constituem um corpo, obtida por operações computacionais digitais baseadas em medidas de emanações que o atravessam.

Track-etching: Técnica de *imageamento* que consiste na gravação de traços sobre uma película, revelados por meio de um processo de corrosão química.

Windowing: Operação realizada sobre uma imagem, para que parte dela possa ser visualizada. O quadro visível (janela) formado por essa operação pode ser deslocado horizontalmente (*pan*) ou verticalmente (*scroll*), permitindo a visualização da imagem completa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGER, Don M., BULL, Stanley R. Measurement of modulation transfer functions of neutron radiographic systems. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 22, p. 145-146, Nov. 1975.

ALIAGA-KELLY, D., NICOLI, D.R. Scintillator screens for neutron radiography. In: RADIOGRAPHY WITH NEUTRONS, 1973, Birmingham. *Proceedings*... London: British Nuclear Energy Society, 1975. p. 51-53.

AMORIM, Valter Alves de. *Construção e instalação de um protótipo de extrator de nêutrons no reator IPR-R1*. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1987a. 19p. (Nota Técnica).

AMORIM, Valter Alves de. *Implantação e desenvolvimento da técnica de neutrongrafia no reator IPR-R1*. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1987b. 20p. (Nota Técnica).

ANDRADE, Marcos Carneiro de *et al.* Characterization of grain structure by image processing: a new implementation based on the Saltykov method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, ROBOTICS AND COMPUTER VISION, 2, 1992, Singapore. *Proceedings*... Singapore: Nanyang Technological University, 1992a. p. CV-14.6.1-14.6.5.

ANDRADE, Marcos Carneiro de *et al.* Caracterização digital da estrutura de grão pelo método de Saltykov. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 5, 1992, Águas de Lindóia, SP. *Anais*... São José dos Campos: INPE, SBC, 1992b. p. 321-327.

ANDRADE, Marcos Carneiro de. *Imageamento microscópico*. Belo Horizonte: Instituto de Ciências Exatas da UFMG, 1993. 76p. (Dissertação, Mestrado em Ciência da Computação).

ARAÚJO, A. de A. Sum of absolute gray level differences: an edge preserving smoothing approach. *Electronic Letters*, v. 21, n. 25-26, p. 1219-1220, Dec. 1985.

ARAÚJO, A. de A. Sum of absolute difference values smoothing: evaluation and application. In: EUSIPCO-86 - EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE, 3, 1986, The Hague, The Netherlands. *Proceedings*... Amsterdam.: Elsevier Science Publishers, 1986. p. 773-776.

ARAÚJO, A. de A. *et al.* Sum of absolute differences smoothing: comparision to new algorithms and application to remote sensing. In: EUSIPCO-90 - EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE, 5, Barcelona, 1990. *Proceedings...* Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990. p. 1043-1046.

ATOMIC ENERGY REVIEW. Vienna, v. 15, n. 2, June 1977.

BARTON, J.P. Neutron radiography - an overview. In: BERGER, Harold (Ed.). *Practical Applications of Neutron Radiography and Gaging.* Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1976. p. 5-19 (ASTM STP 586).

BAYON, G., LAPORTE, A. Methodology used to characterize an industrial neutron radiography facility. Use of the specific image quality indiicator. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht : D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 1003-1011.

BERGER, Harold, BECK, W.N. Neutron radiographic inspection on radioactive irradiated fuel specimens. *Nucl. Sci. Engineering*, Hinsdale, v. 15, n. 4, p. 411-414, April 1963a.

BERGER, Harold. Resolution study of photographic thermal neutron image detectors. *J. Appl. Phys.*, New York, v. 34, n. 4, p. 914-918, April 1963b.

BERGER, Harold, TALBOY, James H., TYLKA, Joseph P. Determination of cadmium burn up in reactor control rods by neutron radiography. *Nucl. Sci. Engineering*, v. 18, n. 2, p. 236-41, Feb. 1964.

BERGER, Harold. *Neutron radiography;* methods, capabilities, and applications. Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1965. 146p.

BERGER, Harold. Characteristics of a thermal neutron television imaging system, *Mater. Eval.*, v. 24, n. 9, p. 475-481, Sept. 1966.

BERGER, Harold. Detection systems for neutron radiography. In: BERGER, Harold (Ed.). *Practical Applications of Neutron Radiography and Gaging.* Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1976. p. 35-57. (ASTM STP 586).

BERGER, Harold. Advances in neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 53, p. 177, Nov. 1986.

BIHARI, Thomas E., GOPINATH, Prabha. Object-oriented real-time systems: concepts and examples. *Computer*, Los Alamitos, v. 25, n. 12, p. 25-32, Dec. 1992.

BILLINGSLEY, F.C. Noise considerations in digital image processing hardware. In: HUANG, T.S. (Ed.) *Picture processing and digital filtering.* Berlin: Springer-Verlag, 1975. p. 249-280. (Topics in Applied Physics, 6).

BOSSI, Richard H., ROBINSON, Alan H., BARTON, John P. High-speed motion neutron radiography. *Nucl. Technol.*, La Grange Park, v. 59, n. 2, p. 363-374, Nov. 1982.

BRENIZER, J.S., SULCOSKI, M.F., MCRAE, D.D. Real-time neutron radiography observations of aerosol filtration. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 47, p. 384-385, Nov. 1984.

BRENIZER, J.S. *et al.* An advanced video system for real-time neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht : D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 571-578.

BRENIZER, Jack S., HOSTICKA, Bouvard, McRAE, Douglas D. Neutron radioscopic applications at the University of Virginia. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 61, p. 105-107, June 1990.

CAMARÃO, Paulo César Bhering. *Glossário de informática*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora: 1989. 733p.

CARBIENER, Wayne A. Nondestructive examination of radioactive material using neutron radiography. *Nucl. Applications*, Hinsdale, v. 2, n. 6, p. 468-70, Dec. 1966.

CIMBALA, John M. *et al.* Application of neutron radiography for fluid flow visualization. *Nucl. Technol.*, La Grande Park, v. 81, n. 3, p. 435-445, June 1988.

CRISPIM, Vergínia Reis, LOPES, Ricardo Tadeu, BORGES, José Carlos. Reconstrução de imagem usando neutrongrafias. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 1, 1986a, Rio de Janeiro. *Anais*... Rio de Janeiro: ABEN, 1986a. v. 2, p. 39-42.

CRISPIM, Vergínia Reis, LOPES, Ricardo Tadeu, BORGES, José Carlos. Filtro de wiener aplicado a um sistema neutrongráfico. *Experientiae*, Viçosa, v. 29, n. 11, dez. 1986b.

CRISPIM, Vergínia Reis. *Desenvolvimento de ensaios não-destrutivos com neutrongrafias*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993. (Tese, Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear e Planejamento Energético). p. 82-84, 99-101.

CRISPIM, Vergínia R., SILVA, Jesse J.G. da, BORGES, José C. Aluminium corrosion detection by neutron radiography. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 2, 1993, Caxambu. *Anais*... São Paulo: ABEN, 1993a. p. 137-138.

CRISPIM, Vergínia R., SILVA, Jesse J.G. da, BORGES, José C. Indicador de pureza de feixe para neutrongrafia. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 2, 1993, Caxambu. *Anais*... São Paulo: ABEN, 1993b. p. 141-142.

DAVIS JR., Clodoveu Augusto. *PixelWare: um sistema de processamento digital de imagens*. Belo Horizonte: Instituto de Ciências Exatas da UFMG, 1992. 89p. (Dissertação, Mestrado em Ciência da Computação).

DAVIS JR., Clodoveu Augusto, ARAÚJO, Arnaldo de Albuquerque. *PixelWare*: um sistema de processamento digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 5, 1992, Águas de Lindóia. *Anais*... São José dos Campos: INPE, SBA, 1992a. p. 275-284.

DAVIS JR., Clodoveu Augusto, ARAÚJO, Arnaldo de Albuquerque. *Manual de projeto do sistema PixelWare*. Belo Horizonte: Departamento de Ciência da Computação da UFMG, 1992b. 119p. (Relatório Técnico RT016/92).

DIAS, Ailton Fernando, ARAÚJO, Arnaldo de Albuquerque. Visualização e análise de radiografias com nêutrons. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 1, 1993, Rio Claro, SP. *Anais*... Rio Claro: UNESP, SBA, 1993a. p. 233-242.

DIAS, Ailton Fernando, ARAÚJO, Arnaldo de Albuquerque. Análise de imagens obtidas por radiografia com nêutrons. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 6, 1993, Recife. *Anais*... Comunicações. Recife: SBC, UFPe, 1993b. p.87-90.

DIAS, Ailton F., ARAÚJO, Arnaldo de A. Processamento digital de imagens aplicado à radiografia com nêutrons. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 2, 1993, Caxambu. *Anais*... São Paulo: ABEN, 1993c. p. 63-64.

DIAS, Ailton Fernando, ARAÚJO, Arnaldo de Albuquerque. *SATIM - Um sistema de classificação de imagens de sensoriamento remoto*. Belo Horizonte: Departamento de Ciência da Computação da UFMG, 1993. 61p. (Relatório Técnico RT019/93).

DIAS, Ailton F., ARAÚJO, Arnaldo de A. Real-time neutron radiography imaging system. In: IS&T/SPIE SYMPOSIUM ON ELECTRONIC IMAGING SCIENCE & TECHNOLOGY, 1994a, San Jose, CA. *Proceedings*... (In press).

DIAS, Ailton F., ARAÚJO, Arnaldo de A., CRISPIM, Vergínia R. Real-time imaging for thermal neutron radiography. In: ICPS'94: THE PHYSICS AND CHEMISTRY OF IMAGING SYSTEMS - IS&T'S ANNUAL CONFERENCE, 47, 1994b, Rochester, NY. *Proceedings*... (In press).

DOMANUS, J.C. *Neutron radiography, techniques and applications*. Roskilde: Risϕ National Laboratory, 1987. 30p. (Risϕ-M-2672).

FRANÇA, Júnia Lessa *et al*. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 2. ed. rev. aum. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1992.

FUGA, Rinaldo. *Neutrongrafia no reator IEA-R1*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1984. 21p. (IPEN-INF-16).

FUJINE, Shigenori, YONEDA, Kenji, KANDA, Keiji. An on-line video image processing system for real-time neutron radiography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, Amsterdam, v. 215, n. 1-2, p. 277-289, Sept. 1983.

FUJINE, Shigenori, YONEDA, Kenji, KANDA, Keiji. An application of the neutron television fluoroscopic system to neutron computed tomography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, Amsterdam, v. 226, n. 2-3, p. 475-481, Oct., 1984.

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.

FUJINE, Shigenori, YONEDA, Kenji, KANDA, Keiji. Digital image processing for real-time neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht : D. Reidel Publishing Co., 1987a. p. 537-546.

FUJINE, Shigenori, YONEDA, Kenji, KANDA, Keiji. Real-time imaging for neutron radiography at KURRI. In: ASIAN SYMPOSIUM ON RESEARCH REACTORS, 1, 1986, Tóquio. *Proceedings*... Kanagawa: Rikkyo University, 1987b. p. 371-380.

FUJINE, S., IKEDA, Y., KOBAYASHI, H. (Comp.) *Collected papers of research activities on neutron radiography in Japan*. Osaka: Kyoto University, 1990. 540p.

FUJITA, H. *et al.* Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 6. MTF's of II-TV digital image systems, *Med. Phys.*, v. 12, n. 6, p. 713, Nov.-Dec. 1985.

GADE-NIELSEN, P., OLSEN, J. Measuring signal-to-noise ratio of typical neutron radiographs. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 851-858.

GALBIATI JR., Louis J. *Machine vision and digital image processing fundamentals*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990. 164p.

GARRETT, D.A., BERGER, H. The technological development of neutron radiography. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 125-142, June 1977.

GONZALEZ, Rafael C., WINTZ, Paul. *Digital image processing*. 2. ed. rev. Reading: Addison-Wesley, 1987. 503p.

GRAY, Dwight E. (Ed.) *American institute of physics handbook*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1972. p. 6/59.

HAGMANN, Dean B., RICHARDS, Wade J. Stationary neutron radiography system. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 60, p. 642-643, Nov. 1989.

HARLOW, C.A., DWYER, S.J., LODWICK, G. On radiographic image analysis. In: ROSENFELD, A. (Ed.). *Digital picture analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 1976. p. 67-148. (Topics in Applied Physics, 11).

HARMS, A.A., GARSIDE, B.K. An analytical model of the recording process in neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 13, n. 2, p. 542, Nov. 1970.

HARMS, A.A., GARSIDE, B.K., CHAN, P.S.W. The edge-spread function in neutron radiography. *J. Appl. Phys.*, New York, v. 43, n. 9, p. 3863-3867, Sept. 1972.

HARMS, A.A., BLAKE, T.G., MARTON, J.P. Neutron imaging with thin gadolinium converters. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 109, p. 253-255, June 1973.

HARMS, A.A. Physical processes and mathematical methods in neutron radiography. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 143-168, June 1977.

HARRIS, James L. Image evaluation and restoration. *Journal of the Optical Society of America*, v. 56, n. 5, p. 569-574, May 1966.

HAWKESWORTH, M.R. Polaroid positive film in neutron radiography. *Journal Phys. E: Sci. Instrum.*, p. 400-401, May 1971.

HAWKESWORTH, M.R. Neutron radiography: equipment and methods. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 169-220, June 1977.

IEEE. *IEEE Standard dictionary of electrical and electronical terms*. New York: John Wiley & Sons, 1972. 716p.

INGMAN, Dov, NOTEA, Amos. Derivative method for edge enhancement in radiographic testing. *Nucl. Tecnol.*, La Grange Park, v. 72, n. 1, p. 99-104, Jan. 1986.

ISHIDA, Masamitsu *et al.* Digital image processing: effect on detectability of simulated low-contrast radiographic patterns. *Radiology*, v. 150, n. 2, Feb. 1984.

JACKSON JR., C.N., BARTON, J.P., PROUDFOOT, E.A. Neutron radiography facility at the Hanford engineering development laboratory. *Mater. Eval.*, v. 37, n. 7, p. 55-61, June 1979.

JAIN, Anil K. *Fundamentals of digital image processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall International, 1989. 569p.

KALLMANN, H. Neutron radiography. *Research*, v. 6, p. 254-260, 1948.

KRÜGER, A. *NCT-ART: A neutron computer tomography code based on the algebric reconstruction technique*. Geesthacht: GKSS - Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 1988. 40 p.

LAPORTE, A. Industrial applications of neutronography in France. In: RADIOGRAPHY WITH NEUTRONS, 1, 1973, Birmingham. *Proceedings...* London: British Nuclear Energy Society, 1975. p. 151-156.

LEVINE, S.H., HUGHES, D.E. Use of real-time neutron radiography at the Penn State Breazeale nuclear reactor for solving industrial problems. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 53, p. 180-181, 1986.

LINDLEY, Craig A. *Practical image processing in C*; acquisiton, manipulation, storage. New York: John Wiley & Sons, 1991. 554p.

LINDSAY, J.T. *et al.* MTF analysis of the near-real time neutron radiography facility at MURR. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht : D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 617-623.

LINDSAY, John T. *et al.* Real time neutron radiography using a Lixi neutron imaging device. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, Amsterdam, v. 242, n. 3, p.525-530, Jan. 1986a.

LINDSAY, J.T., JONES, J.D., KAUFFMAN, C.W. Real-time neutron radiography applications in dynamic fluid flow studies. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 53, p. 181-182, Nov. 1986b.

LOPES, Ricardo Tadeu *et al.* Aplicação de radiações em ensaios não-destrutivos. In: SEMINÁRIO DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 7, 1987, Rio de Janeiro. *Anais*... Rio de Janeiro: ABENDE, 1987. p. 247-260.

MARKUS, John. *Electronics and nucleonics dictionary*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1966. 743p.

MAST, H.-U., BRANDLER, T., STEIN, P. A comparison of X-ray and thermal neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 797-802.

MATFIELD, R.S. A survey of applications of neutron radiography in the UK. In: RADIOGRAPHY WITH NEUTRONS, 1, 1973, Birmingham. *Proceedings*... London: British Nuclear Energy Society, 1975. p. 165-167.

McCLELLAN, G.C., RICHARDS, W.J. Neutron radiography at the NRAD facility. In: BIENNIAL U.S. TRIGA USERS' CONFERENCE, 9, 1984, Anaheim. *Proceedings*... Anaheim: GA Technologies, 1984. p. 1.45-1.52.

McCLELLAN, G.C., TOW, D.M. Neutron tomography of damaged fuel assemblies. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 53, p. 182-183, Nov. 1986.

McRAE, Douglas D. *et al.* Quantitative density measurements from a real-time neutron radiography system. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 53, p. 178-180, Nov. 1986.

MISHIMA, K. *et al.* An application of neutron radiography and image processing techniques to gas-liquid two-phase flow in a narrow rectangular duct. *Annu. Rep Res. React. Inst. Kyoto Univ.*, Kyoto, v. 22, p. 133-141, Nov. 1989.

MORRIS, Christopher (Ed.). *Dictionary of science and technology.* San Diego: Academic Press, 1992. 2432p.

MURATA, Y. Electronic imaging techniques in Japan. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 35-44.

NAGAO, M., MATSUYAMA, T. Edge preserving smoothing. *Computer Graphics and Image Processing*, v. 9, 1979.

NIBLACK, Wayne. *An introduction to digital image processing.* Hertfordshire: Prentice-Hall, 1986. 214p.

NISHIHARA, H. *et al.* Visualization and measurement of fluid phenomena using neutron radiography and image processing techniques. *KURRI Progress Report 1991*, Osaka, p. 294-295, 1993.

OGINO, F. *et al.* Application of neutron radiography to the study of liquid-solid two-phase flow. *KURRI Progress Report 1991*, Osaka, p. 296-297, 1993.

OKAWARA, G.S., HARMS, A.A. Neutron radiography of fast transient processes. *Nucl. Technol.*, La Grange Park, v. 31, n. 2, p. 250-256, Nov. 1976.

PARREIRA, Gilberto Cardoso, ARAÚJO, Arnaldo de Albuquerque. *Um sistema para segmentação de imagens de uso geral.* Belo Horizonte: Departamento de Ciência da Computação da UFMG, 1992. 10p. (Inédito).

PRATT, William K. *Digital image processing.* New York: John Wiley & Sons, 1978. 750p.

RADIOGRAPHY WITH NEUTRONS, 1, 1973, Birmingham. *Proceedings...* London: British Nuclear Energy Society, 1975. 170 p. (Ed. M.R. Hawkesworth).

RANT, J., ILIC, C. Neutron radiography in metallurgy. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 327-360, June 1977.

RAUCH, H., ZEILINGER, A. Hydrogen transport studies using neutron radiography. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 249-290, June 1977.

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.

RICHARDS, W.J., McCLELLAN, G.C., TOW, D.M. Neutron tomography of nuclear fuel bundles. *Mater. Eval.*, Columbus, v. 40, n. 12, p. 1263-1267, Nov. 1982.

ROSENFELD, Azriel, KAK, Avinash C. *Digital picture processing*. v. 1. 2. ed. San Diego: Academic Press, Inc., 1982a. 435p.

ROSENFELD, Azriel, KAK, Avinash C. *Digital picture processing*. v. 2. 2. ed. San Diego: Academic Press, Inc., 1982b. 349p.

ROSS, A.M. Neutron radiographic inspection of nuclear fuels. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 221-247, June 1977.

SCHLOSSER, M.S. Radiographic enhancement and analysis system. *Mater. Eval.*, Colombus, v. 35, n. 11, p.16-18, Nov. 1977.

SHAND, A.M. *An image processing system for fluid studies*. Oxfordshire: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1988. (AERE R 13283).

SOL, Alisson Augusto Sousa. *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).

SOL, Alisson A. S., ARAÚJO, Arnaldo de A. PHOTOPIX: a color image quantization system. In: PCS'93 - 1993 PICTURE CODING SYMPOSIUM, 1993, Lausanne, Switzerland. *Proceedings*... (In press).

SULCOSKI, Mark F., TOBIN, Kenneth W., BRENIZER JR., Jack S. Real-time neutron radiography system performance - measurements and methods. *Nucl. Technol.*, La Grange Park, v. 82, n. 3, p.355-362, Sept. 1988

SYMPOSIUM ON PRACTICAL APPLICATIONS OF NEUTRON RADIOGRAPHY AND GAGING, 1, 1975, Gaithersburg. *Proceedings*... Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1976. 319p. (Ed. Harold Berger).

TAMAKI, M. *et al.* Research on element analysis by quantitative neutron radiography. *KURRI Progress Report 1991*, Osaka, p. 290-291, 1993.

TAMURA, Hideyuki *et al.* Design and implementation of SPIDER - a transportable image processing software package. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, v. 23, p. 273-294, 1983.

TASAKA, K. *et al.* Development and application of neutron radiography. *KURRI Progress Report 1991*, Osaka, p. 288-289, 1993.

TÓFANI, P.C., PAIANO, M.C. *Uses a small research reactor in Brazil*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RESEARCH REACTORS, 1988, Hsinchu, Republic of China. *Proceedings*... (In press).

TOMLINSON, R.L., NEWACHECK, R.L. Development of a neutron radiographic contrast, resolution and scatter indicator (CRASI). *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 531-532, Oct. 1971.

TOMLINSON, R.L. Industrial neutron radiography in the United States of America. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 291-327, June 1977.

TRUSSEL, H. Joel. Processing of X-ray images. *Proceedings of the IEEE*, v. 69, n. 5, May, 1981. p. 615-627.

TSUJII, Y. *et al.* Neutron radiography with Kyoto University Research Reactor. *KURRI Progress Report 1991*, Osaka, p. 292-293, 1993.

UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY. Public Relations Branch. *Glossary of atomic terms*. 8. ed. London, 1974. 62p.

VERAT, M., ROUGEOT, H., DRIARD, B. Neutron image intensifier tubes. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht : D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 601-607.

VIDAL, Maria Helena Telles. *Pequeno dicionário de termos atômicos*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Bibliografia e Documentação, 1958. 20p. (Edição preliminar).

VU HONG, Lac. *Étude des conditions optimales d'emploi des accelerateurs d'ions utilisant la reaction (d, T) en radiographie par neutrons (neutrographie)*: Example d'applications en controle non destructif. Grenoble: Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble, 1971. 147p. (Thèse, Doctorat en Ingénierie).

WALKER, J. Review: radiography with neutrons. In: RADIOGRAPHY WITH NEUTRONS, 1, 1973, Birmingham. *Proceedings*... London: British Nuclear Energy Society, 1975. p. 1-5.

WALL, T., GILLESPIE, P. Neutron radiography at Lucas Heigths. *At. Energy Aust.*, Coogee, v. 18, n. 3, p. 7-12, July 1975.

WATSON, Carol A. X-ray film processing. *Mater. Eval.*, Colombus, v. 35, n. 11, p. 12-14, Nov. 1977.

YONEBAYASHI, Kenji *et al.* Study on two-phase flow using image processing technique. *Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ.*, Osaka, v. 20, p. 181-188, 1987.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

ALGER, D.M., BULL, S.R. Development of a high-resolution thermal-neutron radiography facility. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 530, Oct. 1971.

ALVAR, K. *et al.* Neutron radiography with SNRS. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 439-446.

ANTAL, J.J. *et al.* Experience with an on-off mobile neutron radiography system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1984. p. 407-414.

ASELTINE, C.L., STRICH, R.A. Time-resolved neutron radiography using a fast pulse reactor. *Nucl. Technol.*, Hinsdale, v. 26, n. 1, p. 107-114, May 1975.

AZEVEDO, André Louis Tenuta, STASIULEVICIUS, Roberto. Aplicação da autorradiografia de boro em aços estruturais. *Metalurgia - ABM*, São Paulo, v. 41, n. 330, p. 251-254, maio 1985.

BARTON, J.P. Toward neutron radiography of radioactive objects in hot cells. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 443, Nov. 1967.

BERGER, Harold. Photographic detectors for neutron diffraction. *Rev. Sci. Instrum.*, Lancaster, v. 33, n. 8, p. 844-846, Aug. 1962.

BERGER, H., KRASKA, I.R., DICKENS, R.E. A Polaroid film method for transfer neutron radiography. *Nucl. Sci. Engineering*, Hinsdale, v. 18, n. 1, p. 137-138, Jan. 1964a.

BERGER, Harold, KRASKA, I.R. Neutron radiographic inspection of heavy metals and hydrogeneous materials. *Mater. Eval.*, Columbus, v. 22, p. 305-310, July 1964b.

BERGER, Harold, BECK, W.N. A thermal-neutron television system for posirradiation annealing studies. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 8, n. 1, p. 73-74, June 1965.

BERGER, Harold. Applications of neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 441-442, Nov. 1967.

BERGER, Harold. Some experiments in fast neutron radiography. *Mater. Eval.*, Evanston, v. 27, n. 7-12, p. 245-253, Dec. 1969.

BERGER, Harold. Track-etch radiography: alpha, proton, and neutron. *Nucl. Technol.*, Hinsdale, v. 19, n. 3, p. 188-198, Sept. 1973.

BOLLINGER, L.M., THOMAS, G.E., GINTHER, R.J. Neutron detection with glass scintillators. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 17, p. 97-116, Sept.-Dec. 1962.

BOSSI, R.H., CASON, J.L., JACKSON JR., C.N. The modulation transfer function and effective focal spot as related to neutron radiography. *Mater. Eval.*, v. 30, n. 5, p. 103-108, May 1972.

BRENIZER, J.S., JOHNSON, R.O., BARTON, J.P. Comparison of neutron radioscopic systems. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 403-411.

BUTLER, M.P., HARMS, A.A., LOKOS, S.C. Resolution and contrast in neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 945-950.

CAPPADONA, Carmello. Neutron radiography inside small reactors. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 527-528, Oct. 1971.

CASON, John L., JACKSON, Charlie N. Neutron radiography for nucelar fuel interrogation. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 538-539, Oct. 1971.

CIMBALA, John M. *et al.* Neutron radiography as a flow visualization tool. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 497-504.

CLUZEAU, Serge, DUBOUCHET, Michel. Mobile neutron radiography equipment and sealed neutron tube. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 205-212.

CRISPIM, Vergínia R., LOPES, Ricardo T., ROGERS, John Douglas. Estudo da função de borda difusa para um sistema neutrongráfico. *Rev. Fis. Apl. e Instr.*, v. 1, n. 2, p.229-239, 1986.

CRISPIM, V.R., ROBERTY, N.C., REIS, M.L. Computerized tomography with neutrons. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 865-872.

CRISPIM, Vergínia R., SILVA, Jesse J.G. da, BORGES, José C. Non destructive testing of defects by neutron radiography. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 2, 1993, Caxambu. *Anais*... São Paulo: ABEN, 1993. p. 139-140.

CUTFORTH, D.C., AQUINO, V.G. Neutron radiography in the EBR-II fuel cycle facility using an isotopic neutron source. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 442, Nov. 1967.

CUTFORTH, D.C. On optimizing an Sb-Be source for neutron radiographic applications. *Mater. Eval.*, Evanston, v. 26, p. 49-53, Mar. 1968.

CUTFORTH, D.C. Dimensioning reactor fuel specimens from thermal-neutron radiographs. *Nucl.Tecnhol.*, Hinsdale, v. 18, n. 1, p. 67-70, Apr. 1973.

DANCE, W.E., MAST, H.-U. Performance of operational mobile accelerator neutron radiology (NR) system as scale factor for Diane. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 195-204.

DAVIDSON, J.B., SMITH, H.G., WILLEMS, R.A. A neutron-sensitive image intensifier-television system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 397-402.

FISHMAN, A. *et al.* Extraction of dimensions from radiographs. *Mater. Eval.*, Columbus, v. 39, n. 6, p. 744-747, July 1981.

FOSTER, B.E., SNYDER, S.D., DE CARLO, V.A. High-intensity, high-resolution neutron radiography of nuclear fuels. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 536-537, Oct. 1971.

FUJINE, Shigenori. Digital image processing for real-time neutron radiography and its applications. In: IAERU SEMINAR, 4, 1988, Tokyo. Proceedings... Rikkyo: IAERU, 1989. p. 49-71. (Artigo em japonês).

FUJINE, Shigenori *et al.* Visualization on gas-liquid two-phase flow in a narrow rectangular duct. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 513-521.

GARRETT, D.A., MORRIS, R.A. The application of high-resolution neutron radiography to industrial inspection. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 444-445, Nov. 1967.

GARSIDE, B.K., HARMS, A.A. Detection process in neutron radiography. *J. Appl. Phys.*, New York, v. 42, n. 12, p. 5161-5167, Nov. 1971.

GEUEN, W. A fast edge detection algorithm matching visual contour perception. In: HUANG, T.S. (Ed.) *Image sequencing processing and dynamic scene analysis.* Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 483-492. (NATO ASI Series F: Computer and System Sciences, 2).

HARALICK, R.M. *Pictorial data analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 468p. (NATO ASI Series F: Computer and Systems Sciences, 4).

HARMER, D.S., ALLEN, J.J. Imaging with scattered neutron: an alternate to neutron radiography for thick objects. *Trans. Am .Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 534, Oct. 1971.

HARMS, A.A., YOUNIS, M.H. Beam divergence contribution to image spread in neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 526-527, Oct. 1971.

HARMS, A.A., McCORMACK, G. Isotopic conversion in gadolinium-exposure neutron imaging. *Nucl. Instrum. Meth.*, Amsterdam, v. 118, n. 2, p. 583-587, June 1974.

HARMS, A.A., HEINDLER, M., LOWE, D.M. The physical basis for accurate dimensional measurements in neutron radiography. *Mater. Eval.*, Columbus, v. 36, n. 5, p. 49-56, Apr. 1978.

HARMS, A.A. The measurement of nutron radiographic sharpness. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 921-927.

HARRIS, D.H.C., SEYMOUR, W.A.J. Applications of real time neutron radiography at Harwell. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 595-600.

HASKINS, J.J., HILL, K.R., TUNNEL, G.W. Nondestructive testing of brazed joints using neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 528-529, Oct. 1971.

HAWKESWORTH, M.R. The exposure necessary to discern detail in unsharp neutron radiographs. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 17, p. 90-91, Nov. 1973.

HOLLOWAY, J.A., STUHRKE, W.F., BERGER, H. Low-voltage and neutron-radiographic techniques for evaluating boron-filament metal-matrix composites. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 445, Nov. 1967.

HOYT, J.L., PORTER, C.E., WILKINSON, C.D. Neutron radiography applications at General Electric.*Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 446-447, Nov. 1967.

HUANG, T.S. (Ed.) *Picture processing and digital filtering*. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 289p. (Topics in Applied Physics, 6).

HUANG, T.S. (Ed.) *Image sequencing processing and dynamic scene analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 749p. (NATO ASI Series F: Computer and System Sciences, 2).

IKEDA, Y. *et al.* Neutron radiography imaging with 2-dimensional photon counting method and its problems. In: WORKSHOP ON RADIATION DETECTORS AND THEIR USES, 1988, [s.l.]. *Proceedings...* [s.n.t.].

IKEDA, Y. *et al.* An advanced neutron imaging system using highly sensitive photon-counting camera. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 413-420.

KAKENO, Mitsutaka, KIDO, Yoshiaki, KAWAMOTO, Jun-ichi. Neutron radiography facilities using a 3MV van de Graaf accelerator. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 245-252.

KANDA, Keiji, FUJINE, Shigenori, YONEDA, Kenji. KUR neutron television system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings...* Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 601-608.

KARASEK, Frank J. Techniques for the fabrication of ultra-thin metallic foils. *Nucl. Sci. Enginnering*, Baltimore, v. 17, n. 3, p. 365-370, Nov. 1963.

KASANKE, H.D. Hydrogen sensitive neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 533, Oct. 1971.

KAWAI, Hiroshi *et al.* Neutron radiography facility using low power reactor of Kinki University. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 101-108.

KAWASAKI, S. A thermal neutron television system using a high yield neutron generator. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 62, n. 3, p. 311-315, July 1968.

KOBAYASHI, Hisao, UTSUNOMIYA, Shohei, HAMASAKI, Joji. Novel stereoscopic imaging technique for neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 315-324.

KOBAYASHI, Hisao. Response functions of screen-film systems. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 893-902.

KOK, Kenneth. Evaluation of neutron beams using geometrical optics. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 526, Oct. 1971.

KOURIS, Kusminarto, SPYROU, Nicholas M. Imaging with neutrons in transmission tomography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings...* Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 719-728.

KYOTO UNIVERSITY RESEARCH REACTOR INSTITUTE. *KURRI progress report 1991*; April 1991-March 1992. Osaka: Senbusha Co. Ltd., 1993. 382p. (Ed. K. Okana et al.).

LEWIS, W.J., BENNETT, L.G.I. Development of a neutron radiography beam tube for the slowpoke-2. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 55-62.

LO I YIN, TROMBKA, Jacob I., SELTZER, Stephen M. A portable X-ray imaging system for small-format applications. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 158, n. 1, p. 175-180, Jan. 1979.

MAST, H.U. Neue Anwendungsmöglichkeiten der Neutronnenradiographie. II. Einsatz im Bauwesen und digitale Bildverarbeitung. *Materialprüfung*, München, v. 32, n. 4, p. 115-117, April 1990. (Artigo em alemão).

MATSUMOTO, G. *et al.* Improvement of reconstructed image quality in neutron CT. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 745-752.

MATSUMOTO, G., OHKUBO, K., IKEDA, Y. Real-time imaging with less intense neutron beam. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 547-554.

MONIZ, M.S., HARMS, A.A. Track-etch imaging efficiencies of the $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ and $^{6}Li(n, \alpha)T$ reactions. *Nucl. Instr. Methods*, Amsterdam, v. 122, n. 3, p. 567-573, Dec. 1974.

MORLEY, James A. Two-techniques to increase contrast of track-etch neutron radiographs. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 15, n. 1, p. 120, June 1972.

MOSS, Richard A. The application of neutron radiography to heat-pipe diagnostics. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 445-446, Nov. 1967.

MOSS, Richard A., KELLY, Arnold J. Neutron radiographic study of limiting planar heat pipe performance. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Oxford, v. 13, n. 3, p. 491-502, Mar. 1970.

MÜLLNER, M., JEX, H. Converter-thickness for optimum intensity in neutron-radiography. *Nucl. Instrum. Meth.*, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 229-233, Sept. 1972.

MURATA, Y. *et al.* New architecture for neutron radiography at the Musashi reactor. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 469-478.

MURATA, Y. *et al.* Digital radiography system at the Musashi reactor. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 487-494.

NEELAKANTAN, K., SUBRAMANIAN, V. A simple edge enhancer for neutron radiography. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 158, n. 2/3, p. 399-402, Jan. 1979.

NEWACHECK, Richard L., TSUKIMURA, Ray R. Current status of the ASTM E 545 image quality indicator system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings...* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 875-883.

ORPHAN, V., KEDEM, D., JOHNANSEN, F. Mobile neutron radiography system for aircraft inspection. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings...* Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. p. 447-454.

PARK, Stephen K., SCHOWENGERDT, Robert, KACZYNSKI, Mary-Anne. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems. *Appl. Opt.*, v. 23, n. 15, p. 2572-2582, Aug. 1984.

PARKER, W.L., SUMMERS, P.A., RAU, J.A. Inherent resolution limit for neutron microradiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 530-531, Oct. 1971.

RAU, J.A., PARKER, W.L. Measurement of antiscatter grid effectiveness in thermal-neutron radiography of hidrogeneous materials. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 533-534, Oct. 1971.

RAU, John A., PARKER, William L. Measurement of antiscatter grid effectiveness in thermal-neutron radiography of hidrogeneous materials. *Nucl. Technol.*, Hinsdale, v. 16, n. 2, p. 458464, Nov. 1972.

RAUCH, H., GRASS, F., FEIGL, B. Ein Neuartiger Detektor für Langsame Neutronen. *Nucl. Instr. Meth.*, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 153-156, Jan. 1967. (Artigo em alemão).

REIJONEN, H., JAUHO, P. Observations of carburator icing using neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 529-530, June 1972.

REIJONEN, H., HARMS, A.A. Neutron radiography: summary and projections. *At. Energy Rev.*, Vienna, v. 15, n. 2, p. 361-364, June 1977.

RHODES, E.A., DeVOLPI, A. Image restoration to increase resolution of the fast-neutron hodoscope. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht : D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 487-494.

ROBINSON, A.H., BARTON, J.P. High-speed motion neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 15, n. 1, p. 140, June 1972.

ROGERS, John D. Neutron radiography in Brazil. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 93-98.

ROSENFELD, A. (Ed.) *Digital picture analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 1976. 351p. (Topics in Applied Physics, 11).

SHEPP, L.A., LOGAN, B.F. The fourier reconstruction of a head section. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, New York, v. NS-21, n. 3, p. 21-43, June 1974.

SPOWART, A.R. Optimising neutron scintillators for neutron radiography. *Brit. Jnl. Non-Destr. Test.*, v. 11, p. 2-11, Mar. 1969.

SPOWART, A.R. Neutron scintillating glasses: Part 1. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 135, n. 3, p.441-453, June 1976.

STADE, J. *et al.* Neue Anwendungsmöglichkeiten der Neutronnenradiographie. I. Entwicklungen für den Luftfahrt- und Industrieeinsatz. *Materialprüfung*, München, v. 32, n. 1-2, p. 7-10, Jan.-Feb. 1990. (Artigo em alemão).

STEINBOCK, L. An electronic line camera system for neutron radiography and tomography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 813-820.

SUZUKI, Y. *et al.* Development of imaging converter. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 277-279.

SYH, Hon-Wei, SAXE, Raymond F., WEHRING, Bernard W. Image restoration for neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 431-438.

TAKENAKA, Noboyuki *et al.* Application of real-time neutron radiography to multiphase flow visualization and measurement. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 505-512.

TANIGUCHI, Ryoichi *et al.* Statistical properties of real-time neutron radiographic image. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1984. p. 555-562.

TANIGUCHI, Ryoichi *et al.* Image processing system for the dynamic neutron radiography. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 479-486.

THALER, Lawrence A. The measurement of capsule heat transfer gaps using neutron radiography. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 537-538, Oct. 1971.

TOJO, T., NAKJIMA, T. Preparation of thermal neutron scintillators based on a mixture of ZnS(Ag), ^{6}LiF and polyethylene. *Nucl. Instrum. Methods*, Amsterdam, v. 53, n. 1, p. 163, July 1967.

TRANSACTIONS OF AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. Hinsdale: American Nuclear Society, v. 10, n. 2, p. 441-447, Nov. 1967.

TRANSACTIONS OF AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. Hinsdale: American Nuclear Society, v. 14, n. 2, p. 526-539, Oct. 1971.

TSURUNO, A. *et al.* Design and development on JJR-3 neutron radiography system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 87-92.

VAN OTTERDIJK, K.H., LEEFLANG, H.P. Comparison of optical density profiles from a travelling microdensitometer and a PC based image analysis system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 447-459.

VAN OTTERDIJK, K.H., LEEFLANG, H.P., MARKGRAF, J.F.W. Application of image processing techniques in dimensional analysis. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*... Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 929-944.

VASILIK, Dennis G., MURRI, Richard L., FISCHER, George P. Thermal-neutron radiography with a sealed-tube neutron generator and water moderator. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 535-536, Oct. 1971.

VU HONG, L., JALLIFIER-TALMAT, G. *Étude experimentale d'un système multiplicateur de neutrons thermiques pour la neutrongraphie sous accelerateur.* Grenoble: Centre d'Études Nucleaires de Grenoble, 1972. (Relatório AR-G/72-7/LH/MC).

WALKER, J. Nuclear reactors as research instruments. *Rep. Progr. Phys.*, v. 30, n. 1, p. 285-332, 1967.

WESTBERG, E.L., COLLINS, K.D., GWINN, D.A. The MITR neutron radiography facility. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 14, n. 2, p. 534-535, Oct. 1971.

WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 1, 1981, San Diego. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht: Reidel, 1983. 1073p. (Ed. John P. Barton and Peter von der Hardt).

WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987. 928p. (Ed. John P. Barton *et al.*).

WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 3, 1989, Osaka. *Proceedings*; neutron radiography. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 1011p. (Ed. Shigenori Fujine *et al.*).

WOOD, D.E. Fast-neutron radiography with a neutron generation. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Hinsdale, v. 10, n. 2, p. 443-444, Nov. 1967.

WROBEL, M., GREIM, L. *Resolution functions and unsharpness in neutron radiography*. Geesthacht: GKSS - Forschungzentrum Geesthacht, 1988. (GKSS 88/E/12).

WYMAN, D.R., HARMS, A.A. Neutron image blurring in two dimensions. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, La Grange Park, v. 44, p. 206-297, June 1983.

YOKEDA, Kenji, FUJINE, Shigenori, KANDA, Keiji. Neutron computed tomography using the neutron television system. In: WORLD CONFERENCE ON NEUTRON RADIOGRAPHY, 2, 1986, Paris. *Proceedings*... Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1984. p. 739-744.

YONEDA, Kenji, KANDA, Keiji. Identification measurement of boron burnable poison in fuel side plate by neutron radiography. *Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ.*, Osaka, v. 11, p. 126-128, 1978.