



**COPPE/UFRJ**

DETECÇÃO DE EXPLOSIVOS PLÁSTICOS E NARCÓTICOS, APLICANDO  
NEUTRONGRAFIA EM TEMPO REAL, ALIADA À TOMOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA POR TRANSMISSÃO

Francisco José de Oliveira Ferreira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador(es): Verginia Reis Crispim  
Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2008

DETECÇÃO DE EXPLOSIVOS PLÁSTICOS E NARCÓTICOS, APLICANDO  
NEUTRONGRAFIA EM TEMPO REAL, ALIADA À TOMOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA POR TRANSMISSÃO

Francisco José de Oliveira Ferreira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Verginia Reis Crispim, D.Sc

---

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc

---

Prof. Roberto Schirru, D.Sc

---

Dr. Luis Eduardo Barreira Brandão, D.Sc

---

Dr. Walsan Wagner Pereira, D.Sc

---

Prof. Nilson Costa Roberty, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2008

Ferreira, Francisco José de Oliveira

Detecção de Explosivos Plásticos e Narcóticos, aplicando Neutronografia em Tempo Real aliada à Tomografia Computadorizada por Transmissão / Francisco José de Oliveira Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XII, 121 p: 13; 29,7 cm.

Orientador: Verginia Reis Crispim

Ademir Xavier da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 120-124.

1. Ensaio Não Destrutivo. 2. Detecção de Drogas e Explosivos. 3. Segurança Pública. I. Crispim, Verginia Reis et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que nos proporciona a alegria de viver.

A Prof<sup>a</sup> Verginia Reis Crispim pela confiança, dedicação, compreensão e pela orientação segura demonstrada ao longo deste trabalho.

Ao Prof Ademir Xavier da Silva pela intensa colaboração, pelas sugestões valiosas e discussões a respeito da técnica de radiografia com nêutrons térmicos, pela co-orientação segura demonstrada ao longo deste trabalho e amizade;

Ao IEN e seus funcionários, especialmente aos amigos da equipe de operação do Reator Argonauta: Carlos A C. Renke, Francisco Canindé, André Luiz, João Carlos, Flávio, Dante e Gadelha e a Rosilda pela preparação de amostras.

Aos grandes amigos e companheiros de todas as horas, Robson Ramos, Marco Aurélio Monteiro Dutra e Cezar Marques Salgado pela amizade, paciência e incentivos recebidos em fases deste trabalho.

Ao amigo Luiz Arthur B. França (*in memoria*), pelo exemplo e ensinamentos do início dessa caminhada.

Aos colegas do grupo de Neutronografia do PEN/COPPE/UFRJ pelos incentivos e apoios recebidos.

A meus pais pelo incentivo e orgulho sempre demonstrado.

Aos professores do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ;

À Tânia R.M. Moraes, Josevalda L. Noronha (Jô) e a todo corpo administrativo do PEN/COPPE/UFRJ;

Finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos dois grandes amores da minha vida, aos quais dedico esse trabalho,

*MARISE E FÁBIO*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DETECÇÃO DE EXPLOSIVOS PLÁSTICOS E NARCÓTICOS, APLICANDO  
NEUTRONGRAFIA EM TEMPO REAL, ALIADA À TOMOGRAFIA  
COMPUTADORIZADA POR TRANSMISSÃO

Francisco José de Oliveira Ferreira

Dezembro / 2008

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho, descreve-se o desenvolvimento de uma metodologia dedicada à detecção de explosivos plásticos e narcóticos, que emprega a técnica de Neutronografia em Tempo Real, aliada à Tomografia Computadorizada por transmissão, objetivando o combate ao terrorismo e ao narcotráfico. Ensaios neutronográficos foram realizados no reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear / CNEN com amostras contendo esses materiais e outros passíveis de serem encontrados em bagagens, e postais. Além disso, o desempenho foi testado para diferentes condições de ocultações dessas substâncias ilícitas por traficantes e terroristas. Aplicaram-se técnicas de processamento digital sobre as imagens tomográficas bidimensionais das amostras, obtendo-se os espectros de níveis de cores característicos de cada tipo de material que as compõem. O emprego de técnicas de Inteligência Artificial capacitou a apresentar respostas automáticas, tornando-se complementar a ação de um operador para uma tomada de decisão. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema localizou e identificou a presença de drogas e explosivos com índice acima de 92 % de acertos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EXPLOSIVE AND ILLICIT DRUGS DETECTION BY NEUTRON  
RADIOGRAPHY IN REAL TIME AND COMPUTER TOMOGRAPHY  
TECHNIQUES

Francisco José de Oliveira Ferreira

December / 2008

Advisors: Verginia Reis Crispim

Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

This thesis describes the development of a system to detect drugs and plastic explosives contained in sealed envelopes and packages without opening them, thus helping the fight against terrorism and illicit drugs traffic. The system uses the techniques of Neutron Radiography in Real Time and Computer Tomography by transmission. Neutron Radiographic assays on samples containing these sorts of materials were performed in the research reactor Argonauta at the Instituto de Engenharia Nuclear / CNEN. The system performance was evaluated for some of the different hiding conditions used by terrorists and traffickers in illicit drugs. Digital processing techniques were applied to the bidimensional tomographic images of selected samples, and the characteristic color level spectrum of each sample constituent was determined. The use of Artificial Intelligence techniques made capable of automatic localization and identification of hidden materials, thereby making additional the action of a human operator for decision making. The results showed that the developed system localized and identified the presence of illicit drugs and explosives within a up 92 % of detection probability.

## ÍNDICE

### **CAPITULO I** ***INTRODUÇÃO***

I.1 – Introdução	1
I.2 – Motivação	11
I.3 – Objetivo	12
I.4 – Revisão Bibliográfica	13

### **CAPITULO II** ***FUNDAMENTOS TEÓRICOS***

II.1 – Nêutrons e a Matéria	26
II.1.1 – Interação de Nêutrons com a Matéria	26
II.1.2 – Atenuação dos Nêutrons	29
II.2 – Fontes de Nêutrons	31
II.3 – Ensaios Não Destrutivos	32
II.3.1 – Técnica Neutronográfica	33
II.3.1.1 – Princípios Básicos	33
II.3.1.2 – Neutronografia com Sistema Eletrônico de Imageamento	35
II.3.2 – Tomografia Computadorizada	46
II.3.2.1 – Princípios Básicos	48
II.3.2.2 – Descrição geral dos Algoritmos de Reconstrução	51
II.3.3 – Redes Neurais Artificiais	52

### **CAPITULO III** ***METODOLOGIA***

III.1 – Obtenção da Imagem Tomográfica	58
III.1.1 – Ensaios Neutronográficos	59



III.1.1.1 – Arranjo Neutronográfico	59
III.1.1.2 – Sistema Eletrônico para obtenção de Imagens Neutronográficas em Tempo Real	62
III.1.1.4 – Mesa Tomográfica	68
III.1.2 – Reconstrução das Imagens Tomográficas	70
III.1.2.1 – Algoritmo de Reconstrução de Imagem baseado no Conceito de Entropia Máxima (ARIEM)	72
III.2 – Localização e Identificação de Drogas e Explosivos	73
III.2.1 – Amostras inspecionadas e condições de ocultação	74
III.2.2 – Análise e processamento das imagens tomográficas	78
III.2.3 – Predição da RNA para a classificação e identificação dos materiais inspecionados	80

## **CAPITULO IV**

### ***RESULTADOS***

IV.1 - Caracterização do Sistema Neutronográfico em Tempo Real	84
IV.2 - Imagens Tomográficas	86
IV.3 - Resposta da RNA para a identificação de drogas e explosivos a partir de imagens tomográficas	101

## **CAPITULO IV**

### ***CONCLUSÕES***

V.1 – Conclusões	112
Referencias bibliográficas	115

## ***SIGLAS E ABREVIATURAS***

- 2D – Bi-dimencional.
- 3D – Tri-dimencional.
- ACI – *Ancore Cargo Inspector*.
- ARIEM – Algoritmo de Reconstrução de Imagem baseado em Entropia Máxima.
- AVI – *Audio Video Information*.
- CCD – *Charge Coupled Device*.
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear.
- COPPE – Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia.
- END – Ensaio Não Destrutivo.
- ESF – *Edge Spread Function*.
- EUA – Estados Unidos da América.
- FNA – *Fast Neutron Analysis*.
- IA – Inteligência Artificial.
- IEN – Instituto de Engenharia Nuclear.
- IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- IPF – Indicador de Pureza de Feixe.
- IQI – Indicador de Qualidade de Imagem.
- IS – Indicador de Sensibilidade.
- LNRT – Laboratório de Neutronografia em Tempo Real.
- MCNP – *Monte Carlo N-Particle*.
- MDS – *Mine Detection System*.
- MLP – *Multilayer Perceptron*.
- MTF – *Modulation Transfer Function*.
- NRTR – Neutronografia em Tempo Real.
- OSL – *On Screen Light*.
- PEN – Programa de Engenharia Nuclear.
- PETN - *Pentaerythritol tetranitrate*.
- PFNA – *Pulsed Fast Neutron Analysis*.
- PIXEL – *Element Picture*.
- PL-EDS – *Parcel and Luggage Explosive Detection System*.
- QE - *Quantum Efficiency*.
- RDX - *Cyclotrimethylenetrinitramine*.

RII – Região de Interesse Individual.  
RNA – Rede Neural Artificial.  
SEI – Sistema Eletrônico de Imageamento.  
SPEDS – *Small Parcel Explosive Detection System*.  
TC – Tomografia Computadorizada.  
TNA - *Thermal Neutron Analysis*.  
TNT - *Trinitrotolueno*.  
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
VEDS - *Vehicular Explosive Detection System*.  
VOXEL – *Element Volume*.



# CAPÍTULO I

## *INTRODUÇÃO*

Sejam por motivos econômicos, religiosos, políticos ou sociais, depara-se hoje com um quadro destrutivo mundial, envolvendo nações e sociedades. Atualmente, no mundo globalizado os terroristas têm acesso a armas mais potentes e, os narcotraficantes, a drogas mais perigosas. Para o combate ao terrorismo e ao narcotráfico, ações de inteligência são mais eficazes do que o uso da força.

A adoção de medidas coordenadas e de maior eficiência, no que se refere à vigilância em aeroportos, portos, correspondências postais e outros meios de entrada e saída do terrorismo e narcotráfico nos países, requer o aperfeiçoamento de dispositivos e técnicas para a detecção de narcóticos e explosivos, o que tem mobilizado pesquisadores e instituições de pesquisa, em todo o mundo, sendo inclusive, a motivação do presente trabalho.

O perfil do terrorista do século XXI é de classe média, mentalmente são, educado e bem informado. Guiado por valores, conectado com uma rede mundial, com visão globalizada e mirando um nicho, é o mesmo perfil de um jovem empreendedor. É contra este tipo de terrorista mais preparado que os sistemas de segurança do mundo todo terão que lidar, como o arquiteto *Mohammed Atta*, o piloto do primeiro avião jogado contra o *World Trade Center*, em 11 de setembro de 2001, formado no Cairo, pós-graduado na Alemanha (Editora Globo, Revista *Época* nº 425, 10/07/2006). *Atta* fez o que os especialistas em combate ao terrorismo mais temem: usou sua capacidade intelectual para pôr um mundo criado pela tecnologia a serviço do terrorismo. Por causa de gente como *Atta*, o futuro do terrorismo e do combate a ele, se confunde com a ficção científica, onde, nos dois lados da guerra, a tecnologia tem papel cada vez maior.

Atualmente, os terroristas usam computadores para identificar alvos e planejar ações, celulares, satélites e utilizam a internet para se comunicar. Usam Programas que permitem o envio de informações codificadas, transmitidas por computador para troca de informações e instruções. E o pior, eles não precisam criar nada disso, pois tudo foi desenvolvido pela indústria de alta tecnologia e está acessível, a preço razoável, para

todo o mundo. A tecnologia, associada à capacidade intelectual desses terroristas, podem dotá-los de armas cada vez mais letais, mesmo que originalmente nem fossem armas, como os aviões com tanques cheios de combustível que foram jogados sobre as torres gêmeas no episódio conhecido por “11 de setembro”.

Atualmente, a tecnologia empregada pelos terroristas nos atentados à bomba, a dinamite foi substituída por explosivos mais modernos, tais como os explosivos plásticos (ex. Semtex e C-4) e os explosivos líquidos (ex. nitroglicerina) que têm maior poder de destruição e facilidade de ocultação, não sendo detectáveis por equipamentos de raios-X. Em 2006, na Inglaterra, às vésperas do 5º aniversário do atentado terrorista nos EUA, um plano terrorista foi descoberto. Terroristas pretendiam embarcar em alguns dos 123 vôos diários para os EUA, para, durante o vôo, detonar explosivos líquidos, levados em suas bagagens de mãos. Segundo cálculos da polícia inglesa, cerca de 2700 pessoas morreriam (Editora Globo, Revista Época nº 430, 14/08/2006). A primeira reação à notícia do plano foi de pânico, já que representava um claro sinal de que o terror estaria operante. Medidas de segurança foram otimizadas nos aeroportos do mundo todo, inclusive no Brasil, onde o transporte de substâncias líquidas na bagagem de mão, por passageiros de vôos internacionais, está sujeito a limitações, desde o dia 1º de abril de 2007 [1]. Dentre essas limitações estão: 1- *“As embalagens estão limitadas à capacidade máxima de 1 litro e não excedendo a dimensão de 20x20 centímetros quadrados”*; 2- *“Líquidos em frascos acima de 100 mililitros não poderão ser transportados na bagagem de mão, mesmo se o frasco estiver parcialmente cheio, incluindo também o transporte de gel, pasta, creme, aerosol e similares”*.

Especialistas no combate ao terrorismo analisam diversos cenários de destruição em massa, dentre eles: ataque nuclear; ataque com bomba suja, que utiliza um explosivo normal, misturado a qualquer material radioativo, e ataque biológico. Além destes, computadores infectados por vírus ou programas auto-replicáveis podem gerar milhões de prejuízos.

Mundialmente preocupante, o tráfico internacional de drogas cresceu, nos últimos anos, atingindo, atualmente, uma cifra anual superior a US\$ 500 bilhões [2]. Esta cifra supera os lucros advindos do comércio internacional de petróleo; o narcotráfico é o segundo item no comércio mundial, só sendo superado pelo tráfico de armas [3]. Estes

são índices objetivos da decomposição das relações de produção: o mercado mundial, expressão mais elevada da produção capitalista, está dominado primeiro por um comércio da destruição e segundo por um tráfico declaradamente ilegal. Nos últimos anos, o tráfico mundial cresceu 400%. Nos últimos quinze anos, o número de apreensões de carregamentos multiplicou-se por noventa. Ainda assim afetou apenas entre 10 e 20% do comércio mundial. Atualmente, o narcotráfico é um dos negócios mais lucrativos do mundo. Sua rentabilidade se aproxima dos 3.000%. Os custos de produção somam 0,5% e os de transporte, gastos com a distribuição (incluindo subornos), 3% em relação ao preço final de venda. De acordo com dados recentes, o quilo de cocaína custa US\$ 2.000 na Colômbia, US\$ 25.000 nos EUA e US\$ 40.000 na Europa [3].

Para os EUA o principal país consumidor, o narcotráfico é, um grande problema, bilhões de dólares têm sido gastos na guerra aos traficantes e igual quantia tem sido perdida, em consequência do vício dos cidadãos norte-americanos (gastos com reabilitação, perdas na produção, aumento da criminalidade etc.). Por outro lado, o narcotráfico é de grande utilidade para os EUA, gerando lucro, pois, com a venda dos componentes químicos das drogas, a economia americana recebe em torno de US\$ 240 bilhões, uma parte dos quais é investida em diversos setores da economia ou para os bancos [3].

A América Latina participa do narcotráfico na qualidade de maior produtora mundial de cocaína. A Colômbia detém o controle da maior parte do tráfico internacional. A expansão dessa atividade na América Latina significou a degradação de vários países, já que o comércio de cocaína já representa 75% do PIB boliviano e 23% de outras nações. A oferta de cocaína latino-americana responde à demanda dos 40 milhões de consumidores das drogas legais, um mercado incomensuravelmente maior que o do álcool e do fumo tradicional [2].

Os lucros produzidos pelo narcotráfico, de maneira nenhuma, enriquecem os países produtores. Nos EUA, calcula-se em 20 milhões o número de consumidores regulares de drogas, que gastam aproximadamente US\$ 150 bilhões. Desse total, entre US\$ 5 e 10 bilhões foram os lucros dos cartéis produtores na Colômbia, mas apenas US\$ 1 bilhão foi investido na economia oficial do país. E o restante? Calcula-se que

90% dos lucros do narcotráfico sejam recebidos pelos grandes bancos, por depósitos dos produtores e dos intermediários, e por comissões pela "*lavagem*" do dinheiro [3].

Em nosso país, a sociedade brasileira assiste, permanentemente assustada, a evolução do crime organizado com guerras entre as quadrilhas e mortes de terceiros, moradores ou transeuntes, além de agentes da polícia. A guerra do narcotráfico, que engloba a corrupção e o crime organizado, é ainda alimentada pelos problemas sociais, tais como: fome, analfabetismo, baixos salários e desemprego. É evidente que a ética é pisoteada e a violência assume proporções inimagináveis, gerando ondas de pessimismo, medo e frustrações.

Várias operações especiais realizadas pela Receita Federal em conjunto com a polícia Federal acabaram revelando a existência de grandes organizações criminosas especializadas em fraudes no comércio exterior, que operacionalizam a entrada de drogas, armas, produtos piratas, etc. A estratégia dos traficantes internacionais de armazenar cocaína prensada em cilindros de aço hermeticamente fechados, para dificultar a visualização pelo aparelho de raios X instalado no aeroporto internacional Tom Jobim, no Rio de Janeiro (Jornal O Globo de 22 de junho de 2006), assim como a apreensão de maconha enviada pelos *CORREIOS*, dentro de embalagens para encomendas via *SEDEX* (Jornal O Globo de 24 de agosto de 2006), mostram tanto o nível intelectual, como a astúcia dos narcotraficantes. Neste momento, em que a sociedade exige um esforço nacional de combate à violência e ao crime organizado, a prevenção e a repressão ao narcotráfico tornam-se imprescindíveis.

Várias metodologias têm sido usadas objetivando a redução da possibilidade de ataques terroristas e se combater o tráfico de drogas, que incluem uma grande variedade de procedimentos, que podem ser usados separadamente ou em combinação, e compreendem desde uma simples revista manual, parcial ou total, de bagagens ou suspeitos até uma inspeção de forma automatizada, utilizando-se técnicas nucleares. Alguns métodos mais tradicionais utilizados nos aeroportos são descritos a seguir [4]:

A realização de uma *perfilagem* requer a consulta a uma base padronizada de dados, a comparação do perfil de base com as características do passageiro determina se ele é um suspeito e, conseqüentemente, se deverá ser submetido a um exame adicional.



O método de *correlação passageiro-bagagem* requer que todos os itens da bagagem estejam associados às características do passageiro e que nenhuma bagagem seja embarcada sem que seu proprietário não tenha embarcado.

A *inspeção manual de passageiro-bagagens* tem sido extensivamente usada, particularmente em vôos internacionais de alto risco. Ela é eficaz, especialmente, quando usada em conjunto com a *perfilagem* de passageiros, podendo, conforme a situação, ser realizada por amostragem, onde 25 a 40 % dos passageiros são selecionados para a revista manual [5]. Além disso, novas normas e critérios de segurança mais rígidos têm sido adotados para as bagagem de mão. A ameaça de utilização de explosivos líquidos em vôos da Inglaterra para os EUA, em 2006, resultou na limitação de volume e até mesmo, na proibição de embarque de líquidos em aviões [1].

O uso de *detectores de metais e sistemas de rastreamento* não identificam os explosivos plásticos, detectando somente as bombas, cujos detonadores são metálicos. Atualmente, são empregadas outras técnicas de inspeção, tais como, radiografia com raios X e raios  $\gamma$  além da detecção por traços e vapores, porém, são muito deficientes a este respeito [6].

Na *detecção química*, vários detectores químicos especiais foram desenvolvidos; que registram uma pequena quantidade de vapor emitido pelos materiais, porém, a baixa emissão de vapor limita sua utilização.

Outra alternativa é o *emprego de cães farejadores*, que oferecem como vantagens: uma variedade de condições de trabalho, incluindo espaços confinados e terrenos complicados; a redução do esforço humano; e um menor tempo requerido para muitas operações.

O *emprego de raios X* tem sido crescente, em função da necessidade de diagnósticos industriais e médicos, porém, substâncias com baixa densidade de elétrons, tais como explosivos ou materiais plásticos e drogas, são transparentes aos raios X (principalmente os de alta energia empregados na inspeção de objetos mais volumosos), pois têm uma baixa probabilidade de interação com esse tipo de radiação [7]. Além

disso, a interação dos raios X com a matéria não possibilita se distinguir diferentes substâncias com densidades físicas próximas, a partir das imagens produzidas. Os equipamentos mais modernos proporcionam algumas informações adicionais úteis, mas não superam limitações básicas, tais como: a pequena penetração na matéria por raios X de baixa energia ou espalhados; incapacidade de distinguir materiais orgânicos e explosivos plásticos; necessidade de análise humana, tendo em vista que não são equipamentos automatizados. Comparativamente aos nêutrons, os raios X têm como principal desvantagem uma baixa probabilidade de interação com elementos de baixa densidade eletrônica, dos quais os explosivos e drogas são compostos.

Os explosivos plásticos modernos (*SEMTEX*, *C-4*) podem ser facilmente moldados e camuflados, dificultando o processo de detecção, mesmo por examinadores experientes. Além disso, os narcotraficantes estão utilizando artifícios, tais como, o envio de encomendas via *SEDEX* e encapsulamento da droga com aço, com a finalidade de “enganar” os sistemas de inspeção tradicionais. As autoridades de segurança internacional têm, portanto, reconhecido a necessidade de se dispor de um sistema em tempo real e automatizado que detecte esses materiais suspeitos.

Uma componente primordial para se combater o terrorismo e o narcotráfico será a implementação de inspeções que utilizem tecnologias mais apropriadas, que reúnam algumas características, tais como: eficiência de detecção do material especificado, rapidez, flexibilidade e respostas automáticas [6].

#### ***TÉCNICAS NUCLEARES EMPREGADAS NA DETECÇÃO DE EXPLOSIVOS E NARCÓTICOS***

Após os ataques terroristas ocorridos em 11 de setembro de 2001 nos EUA, houve uma grande retração na divulgação, tanto dos aspectos políticos como os de desenvolvimento tecnológico voltados para o tema “*combate ao terrorismo*”. Existe um grande receio por parte das autoridades internacionais responsáveis pela segurança mundial, de que, em decorrência da globalização, que facilita o acesso ao conhecimento de novas tecnologias, os terroristas adquiram informações que os levem a utilizar táticas que tornem inúteis as tecnologias mais avançadas desenvolvidas, nos últimos tempos. Por outro lado, a escassez de informações tem provocado uma grande dificuldade de acesso a essas informações pelos pesquisadores.

As técnicas nucleares, em função do grande poder de penetração das radiações utilizadas, têm demonstrado possuir qualidades essenciais para serem empregadas num sistema de detecção de explosivos e narcóticos, por permitirem inspecionar grande quantidade de amostras com relativa rapidez, sensibilidade, especificidade e decisão automatizada [6].

Diversas tecnologias baseadas na inspeção utilizando nêutrons foram desenvolvidas nas últimas décadas. Na Tabela I.1, são apresentadas as principais técnicas aplicadas na detecção de drogas e explosivos [8] [9]. Sobre as quais alguns sistemas se baseiam e se encontram listados na Tabela I.2 [6].

Tabela I.1 – Principais técnicas aplicando nêutrons

TÉCNICA	RADIAÇÃO UTILIZADA	REAÇÃO NUCLEAR PREDOMINANTE	RADIAÇÃO DETECTADA	FONTES	ELEMENTOS PRIMÁRIOS / SECUNDÁRIOS DETECTADOS
TNA ( <i>Thermal Neutron Analysis</i> )	Nêutrons térmicos	(n,γ)	Raios γ produzidos após a captura de nêutrons pelo núcleo	Irradiadores com fonte radioisotópicas <sup>252</sup> Cf ou Gerador de Nêutrons	Cl, N, <sup>235</sup> U, <sup>239</sup> Pu, H, metais, P, S
FNA ( <i>Fast Neutron Analysis</i> )	Nêutrons de alta energia (14 MeV)	(n,n'γ)	Raios γ produzidos por espalhamento inelástico de nêutrons	Gerador de Nêutrons	O, C (N) (H) Cl, P
FNA/ TNA	Nêutrons de alta energia (14 MeV) pulsados e nêutros térmicos entre os pulsos	(n,n'γ) + (n,γ)	<b>Durante o pulso</b> (Raios γ produzidos após a captura de nêutrons prontos e atrasados)  <b>Após o pulso</b> (Raios-γ produzidos por espalhamento inelástico de nêutrons)	Gerador de Nêutrons	N, Cl, <sup>235</sup> U, <sup>239</sup> Pu, H, C, O, P, S.
PFNA ( <i>Pulsed Fast Neutron Analysis</i> )	Nêutrons de alta energia (14 MeV) pulsados em intervalo de tempo de nano segundos (ns)	(n,n'γ)	Raios γ produzidos por espalhamento inelástico de nêutrons	Gerador de Nêutrons	O, C, N, CL, <sup>235</sup> U, <sup>239</sup> Pu, H, METAIS, Si, P, S,
API	Nêutrons de alta energia (14 MeV) em coincidência com partículas α	(n,n'γ)	Raios γ produzidos por espalhamento inelástico de nêutrons coincidentes com a emissão de partículas α	Gerador de Nêutrons	O, C, N, METAIS
NRA	Nêutrons rápidos pulsados (espectro de 0,5 a 4 MeV)	(n,n)	Nêutrons após espalhamento elástico e ressonância	Gerador de Nêutrons	O, H, C, N

Tabela I.2 – Descrição dos principais sistemas desenvolvidos, visando combate ao terrorismo e narcotráfico

SISTEMA	TÉCNICA NUCLEAR	APLICAÇÃO	DETECÇÃO (%)	EMPREGO
<b>PL-EDS</b> ( <i>Parcel and Luggage explosive detection system</i> )	TNA com imagem	Detecção de pequenas quantidades/volumes de explosivos (sólidos, líquidos, ou pó), drogas, materiais químicos e nucleares	85 - 90	Aeroportos (verificação de bagagens em salas de embarque e postos aduaneiros)
<b>SPEDS</b> ( <i>Small parcel explosive detection system</i> )	TNA	Detecção de pequenas quantidades/volumes de explosivos (sólidos, líquidos ou pó), e drogas escondido dentro itens, tais como: laptop, eletrônicos, pastas.	> 90	Aeroportos
<b>MDS</b> ( <i>Mine detection system</i> )	TNA ( em conjunto com detectores de metais e radar de penetração térrea e outros meios)	Detecção de minas (explosivos) subterrâneas	> 95	Base militares, e zonas de guerra
<b>SPEDS</b> (modificado)	TNA (em conjunto com detectores de metais e radar de penetração térrea e outros meios)	Verificação da presença de explosivos (ex. minas) ou produtos químicos	---	Base militares, e zonas de guerra
<b>VEDS</b> ( <i>Vehicular explosive detection system</i> ), SeaVEDS ( <i>man-portable VEDS</i> )	TNA	Detecção de explosivos, drogas e outros produtos químicos	95	Inspeção de veículos em: postos aduaneiros, portos, estradas e acesso a instalações sensíveis e estratégicas.
<b>ACI</b> ( <i>Ancore Cargo Inspector</i> )	PFNA	Detecção de materiais perigosos ao ambiente, bens pessoais, material nuclear. Inspeção em caminhões, container's, terminais de carga aéreos.	> 95	Inspeção em alta velocidade de bagagem, utilizado em terminais de carga aéreos e marítimos.
<b>VEDS</b> ( <i>Vehicular explosive detection system</i> ), ACI ( <i>Ancore Cargo Inspector</i> )	TNA PFNA	Detecção de material nuclear ou materiais perigosos (misturas) rejeitos nucleares.	----	Instalações de reprocessamento nuclear, instalações do ciclo de combustível nuclear e descontaminação prévia destes tipos de áreas.

Apesar da potencialidade das técnicas e do desenvolvimento de sistemas modernos, descritos anteriormente, o emprego da ativação neutrônica exige uma fonte de nêutrons rápidos com elevada intensidade, acima de  $10^8 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$  [10] [11]. Para se obter essa intensidade de nêutrons rápidos, normalmente utiliza-se fontes isotópicas de alta atividade ( $GBq$ ) ou geradores de nêutrons eletrônicos, tornando necessário uma grande espessura de blindagens, além do alto custo financeiro, existindo a possibilidade de provocar a ativação de outras substâncias presentes no objeto inspecionado, além disso a utilização desses dispositivos implicariam em adoção de medidas de radioproteção bastante restritivas, o que pode causar grande desconforto e até mesmo resistência por parte do público em geral, o que seria um fato proibitivo a utilização desses sistemas em áreas de grande circulação de pessoas, tais como um aeroporto [7]. Outro aspecto a analisar é o tempo necessário para se inspecionar um objeto, nesse sentido as técnicas que envolvem a ativação neutrônica demandam um tempo relativamente longo, devido ao tempo de irradiação necessário para ativar os materiais, somando o tempo necessário para se obter uma estatística de contagem suficiente para se proceder a análise por espectrometria.

A esse respeito o sistema tomográfico desenvolvido pode ser utilizado dispondo-se de um fluxo de nêutrons térmicos relativamente baixo,  $10^5 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , (conforme descrito na seção II.3.5.3), sendo possível a obtenção deste fluxo utilizando irradiadores de pequeno porte, que usam fontes isotópicas de baixa para média atividade [12] [13] [14] [15], o que implica na adoção de procedimentos de radioproteção menos restritivos, minimizando bastante a intrusão, não alterando a rotina de funcionamento da instalação. Além disso a aplicação de técnicas de Ensaios Não destrutivos (END) como a Neutrografia em Tempo Real (NRTR) que permite a obtenção de imagens em tempo real, aliada ao Algoritmo de Reconstrução de Imagem baseado no conceito de Entropia Máxima (ARIEM) capaz de gerar imagem TC a partir de poucas projeções, e a automação das resposta através de RNA, capacitam o sistema desenvolvido a realizar inspeções rápidas e com auto índice de acertos, como será mostrado adiante.

## ***1.2 – MOTIVAÇÃO***

O reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) tem sido utilizado há vários anos como fonte de nêutrons térmicos, possibilitando investigações qualitativas e quantitativas em alguns campos de aplicação da técnica neutronográfica. Os primeiros trabalhos foram realizados em 1972, com a instalação de um arranjo experimental no canal de irradiação J-9 [16].

A partir de 1977, diversas teses de mestrado e doutorado do Programa de Engenharia Nuclear (PEN) da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foram realizadas, objetivando a aprimoramento do arranjo neutronográfico e a qualificação dos END realizados, demonstrando as potencialidades da neutronografia e a possibilidade de se aplicar a técnica no País [17].

A partir de 1995, no Laboratório de Neutronografia em Tempo Real (LNRTR) do PEN / COPPE - UFRJ vários estudos sistemáticos, visando estabelecer novas aplicações para a técnica neutronográfica, foram iniciados. Durante os últimos anos, vários trabalhos de relevância foram realizados, dentre os quais destacamos: *Uso de um Feixe de Nêutrons Térmicos para Detecção de Narcóticos e Explosivos por Tomografia, para Aplicação na Segurança Pública Nacional* [14], *Detecção de Explosivos Plásticos por Neutronografia Térmica* [18]. Ainda no sentido de acompanhar a evolução da técnica neutronográfica, foi realizado um estudo visando a implantação de um Sistema Eletrônico de Imageamento (SEI) [19], para possibilitar a realização de inspeções neutronográficas em tempo real.

Após os sucessos obtidos com os trabalhos desenvolvidos por da Silva [14], nas simulações com o código de transporte de partículas “*MCNP-versão 4B*”, que geraram os dados de projeções utilizados para obter imagens tomográficas por transmissão, usando o algorítmico “*ARIEM*”, e por Hacidume [18], na reconstrução de imagens tomográficas, a partir de neutronografias obtidas no reator Argonauta em que demonstraram a potencialidade da neutronografia aliada a tomografia para a detecção de drogas e explosivos, o desenvolvimento do Sistema Tomográfico por Transmissão com Nêutrons em foco, tornou-se uma meta de pesquisa do LNRTR/PEN/COPPE/UFRJ. Assim sendo, a maior motivação para o desenvolvimento do presente tema consiste da necessidade de se prover os aeroportos brasileiros de tecnologia avançada e automatizada, dedicada à

detecção de drogas e explosivos plásticos, visando o combate ao terrorismo e ao narcotráfico.

### ***1.3 - OBJETIVO***

O objetivo do presente trabalho é descrever o desenvolvimento de um sistema tomográfico por transmissão com nêutrons, dedicado à detecção de materiais ilícitos, isto é, drogas e explosivos, visando o combate ao terrorismo e ao narcotráfico, por meio de END realizados com técnica NRTR. Esse sistema é composto por quatro subsistemas, a saber: (1) - Sistema Eletrônico de aquisição de Imagens neutrongráficas em tempo real (SEI); (2) - sistema tomográfico de 3<sup>a</sup> geração; (3) – sistema computacional dedicado à reconstrução da imagem tomográfica por algoritmo baseado no princípio de máxima entropia (ARIEM); (4) – sistema de Inteligência Artificial (IA) para reconhecimento automático dos materiais de interesse.

No capítulo II, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para o entendimento do funcionamento do sistema de detecção desenvolvido, nesse sentido são descritos os seguintes tópicos: interação dos nêutrons com a matéria; fontes de nêutrons; Neutronografia em Tempo Real e Tomografia Computadorizada por transmissão; processamento digital de imagens e a aplicação de Redes Neurais Artificiais na identificação de padrões.

No capítulo III, é apresentada a metodologia empregada no desenvolvimento do sistema, sendo descritos: o arranjo neutrongráfico experimental instalado no canal J-9 do reator Argonauta do IEN/CNEN; o sistema tomográfico por transmissão; as amostras de drogas, explosivos e outros materiais utilizadas; os procedimentos experimentais utilizados para a obtenção das imagens tomográficas; e a metodologia empregada na localização e identificação automáticas dos materiais ilícitos.

No capítulo IV, são apresentados os resultados obtidos: primeiro são apresentados as características de desempenho dos sistemas de neutronografia em tempo real e sistema tomográfico; em seguida as imagens tomográficas obtidas nos ensaios realizados com as amostras de drogas, explosivos plásticos, e outros materiais, bem como as condições de ocultação usadas; e as respostas obtidas no treinamento de redes neurais artificiais, para a detecção automática das drogas e explosivos.



#### ***1.4 – REVISÃO DE LITERATURA***

Em 1963, **H. Berger** determinou experimentalmente a capacidade de diversos métodos de detecção de imagens neutrongráficas para produzir radiografias de alto contraste [20]. Para a determinação da resolução espacial foram realizadas neutrongrafias de um Indicar Visual de Resolução (IRV) ou penetrâmetro, confeccionado com uma placa de cádmio contendo orifícios de diferentes diâmetros, distanciados entre si com espaçamentos decrescentes. Dentre os métodos de detecção testados, os que produziram a melhor resolução para imagens com nêutrons térmicos utilizaram o método direto de exposição, com conversores de gadolínio, de fluoreto de lítio enriquecido  ${}^6\text{LiF}$  e um cintilador fino de boro, sulfeto de zinco ativado com prata  ${}^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . As comparações entre tempos de exposição e resolução descritas por Berger foram de grande utilidade para a escolha do método de detecção a ser empregado nas diferentes aplicações da Neutronografia.

Em 1986, **V. Orphan, D. Kedem e F. Johansen** desenvolveram um sistema neutrongráfico móvel, para inspeção de corrosão em estruturas de alumínio de aeronaves. O sistema era composto de duas partes: 1) fonte de nêutrons térmicos constituída de um gerador de nêutrons, marca Kaman A-711 com funcionamento baseado na reação nuclear  $\text{T}(\text{d},\text{n})\text{}^4_2\text{He}$ , com uma montagem otimizada de moderador/colimador, que fornecia um fluxo de nêutrons térmicos, no plano de imagem, de  $5 \cdot 10^4 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , para uma razão de colimação,  $L/D$  de 24; 2) um O SEI em tempo real, composto de uma tela cintiladora, um espelho montado a  $45^\circ$ , em relação ao plano da imagem, que transmitia a imagem na direção de um sistema óptico, composto de um intensificador de imagem *Thomson* de 9” e uma câmera de TV de alta qualidade. O sinal de vídeo era enviado a um micro-computador PC, provido de recursos com as funções necessárias para o tratamento das imagens e seu posterior arquivamento. Durante as exposições, a segurança contra a radiação era assegurada por cordões de isolamento e placas de sinalização, a um raio de 60 metros em torno da aeronave; em adição, foram instalados sensores infravermelhos que disparavam um alarme sonoro, caso alguém se aproximasse. Quanto ao desempenho do sistema, ele excedeu às expectativas iniciais estabelecidas pela Marinha dos EUA; a sensibilidade determinada foi 0,024” para o polietileno, e 0,025”, para o alumínio. Para determinar a

resolução do sistema, utilizou-se um IRV, sendo que o sistema conseguia visualizar 7 furos, num tempo de integração de 4 segundos, e 11 furos, em 8 segundos de integração.

Em 1986, **D. Kendem, R. Polichar, V. Orphan, D. Shreve** publicaram os resultados referentes a um SEI ao utilizarem a técnica neutronográfica e fontes neutrônicas de baixa intensidade [12]. Destacaram que o desempenho desses arranjos dependia de alguns fatores principais, tais como: o fluxo de nêutrons provindo da fonte; o arranjo moderador/colimador que fornecia o melhor fluxo de nêutrons térmicos; o sistema de imageamento compatível com a energia dos nêutrons térmicos e manipulação de equipamentos de alta tecnologia.

Em 1986, **H. Berger** publicou um artigo sobre os avanços alcançados na área de radiografias com nêutrons [21], enumerando diversas aplicações como na inspeção de explosivos, lâminas de turbinas, montagens mecânicas, escoamento de fluídos e detecção de corrosão oculta em metais. Segundo Berger, uma fonte de nêutrons adequada para radiografia deve atender às seguintes especificações: fluxo de nêutrons térmicos, no plano da imagem, igual ou superior a  $10^6 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; razão de colimação,  $L/D$  igual ou superior a 20; conteúdo de nêutrons térmicos igual ou superior a 55%; razão  $n/\gamma$  igual ou maior a  $10^5 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mR}^{-1}$ . Nessa época, dois métodos radiográficos com nêutrons vinham recebendo grande atenção em termos de pesquisa e desenvolvimento: a tomografia computadorizada e a formação eletrônica de imagem em tempo real.

Em 1992, **F. Casali, P. Chirco, A. Festinesi, A. Garagnani, P. Parteni e R. Rosa** publicaram um artigo sobre o desenvolvimento de um SEI com a técnica neutronográfica, utilizando uma câmera CCD refrigerada [22]. Para o desenvolvimento desse sistema neutronográfico em tempo real, foi utilizado como fonte o reator Triga do *Consigliol of Ricerca Sperimentale* (C.R.E.), em Roma, dispendo de um fluxo de nêutrons, no plano da imagem, de  $1,4 \cdot 10^6 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , uma razão de colimação,  $L/D$  de 30 e uma razão de cádmio de 4. O SEI era constituído de uma placa cintiladora, sendo testadas a NE-426, por produzir uma maior taxa de emissão de luz, e depois a NE-905, por proporcionar uma maior resolução espacial; um espelho montado a  $45^0$  para refletir a imagem em direção à câmera CCD, fabricada por *Santa Barbara Instrumentation Group*, modelo ST4, acoplada a lentes *Canon* com Zoom  $f = 100 - 200 \text{ mm}$  e sistema de refrigeração da *Texas Nuclear*. Todo o SEI foi montado dentro de uma caixa à prova de luz. Alternativamente, foram realizados testes com uma câmera fotográfica comum da marca *Ricoh*, com filme *Kodak*

$T_{max}$  3200. O sinal de vídeo gerado pela câmera CCD foi enviado a um micro-computador, através de uma interface RS 232. O software processa as imagens com 256 níveis de cinza e as grava em formato TIFF. Para os testes realizados com a câmera *Ricoh*, o tempo de exposição foi de 190 minutos, enquanto que, com a câmera CCD o tempo variou de 1 a 10 minutos. As respostas obtidas com a câmera *Ricoh* mostraram-se bem melhores do que as fornecidas pela câmera CCD, em função de dois principais efeitos: 1) o ruído eletrônico intrínseco do CCD, que apesar de ser refrigerado, gera uma corrente que não é desprezível e impede seu uso por um tempo superior a 10 minutos; 2) o ruído externo à câmera, geralmente causado pelos raios- $\gamma$  presentes no feixe provido do canal de irradiação ou de reações decorrentes da interação dos nêutrons com os materiais que compõem o sistema.

Em 1992, **J.T. Lindsay**, publicou suas conclusões sobre o emprego do método da Função de Transferência por Modulação (MTF), para caracterização dos SEI com sensores de nêutrons [23], descreveu que, dentre os métodos desenvolvidos para avaliar a qualidade de imageamento dos sistemas radiográficos, o da MTF é o mais apropriado e tem duas importantes características que a tornam uma poderosa ferramenta: não é sensível a fatores como flutuações e análises visuais; em sistemas multicomponentes, pode ser obtida pela multiplicação de suas componentes individuais, que são lineares e podem ser determinadas independentemente. Isso é usado particularmente na otimização e/ou correção de cada componente. Consta ainda no artigo uma introdução a física básica sobre MTF, fornecendo as equações apropriadas à aplicação dessa função.

Em 1993, **V. R. Crispim**, em sua tese de doutorado, intitulada “*Desenvolvimento de Ensaios Não destrutivos com Neutronografias*” [17], concentrou-se na instalação de um sistema tomográfico, no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta do IEN/CNEN, com o objetivo de detectar e localizar corrosões ocultas em ligas de alumínio AA 7075. Vários IQ's (Indicadores de Qualidade) recomendados pela ASTM E 545 foram construídos, com o objetivo de caracterizar o arranjo neutronográfico e analisar as imagens neutronográficas obtidas. A partir dos limites observáveis, foram realizadas tomografias com seis diferentes projeções neutronográficas, para as quais foi construído o algoritmo (ARIEM), baseado no princípio de entropia máxima. Foram realizadas simulações, variando-se o número de projeções e discretização, com o objetivo de se verificar o desempenho do algoritmo, que

demonstrou convergir em menos de três interações, reconstruindo satisfatoriamente imagens com apenas 6 projeções e 103 abscissas.

Em 1995, **F. Casali, P. Chirco, M. Zanarini** relataram os avanços das técnicas de imageamento com nêutrons. Descreveram as técnicas de ensaios com nêutrons, neutrografia e tomografia, dando grande ênfase aos SEI, em termos dos princípios de funcionamento de cada um de seus componentes e das formas existentes de se qualificar as imagens [24].

Em 1996, **A. Sinha, B. D. Bhawe, C. G. Panchal** utilizaram uma pequena fonte de nêutrons portátil e telas cintiladoras na obtenção de neutrografias [25]. O feixe de nêutrons provinha de um pequeno irradiador composto de fonte de Pu-Be, com moderador de polietileno e blindagem de parafina borada, cuja fluência era de  $2 \cdot 10^7 n \cdot s^{-1}$ , para uma razão de colimação  $L/D$  de 10 e uma razão de cádmio de 2,5. O SEI utilizava o cintilador NE-426, acoplamento óptico com lentes e fibra ótica, ligados a dois intensificadores de imagem com ganhos de 30.000 e 100.000, respectivamente, e uma câmera CCD *Hitachi*, modelo KP-M1ek. O sinal de vídeo era enviado a um micro-computador para digitalização das imagens (8 bits), execução das funções de integração e equalização das imagens. Concluíram que era possível se obter neutrografias de boa qualidade em poucos minutos, de 10 a 12 minutos, sendo possível distinguir falhas de até 2 *mm*. Ressaltaram também a necessidade de cuidados especiais de radioproteção ao se manusear o irradiador portátil.

Em 1996, **V.R. Crispim e J.J.G. Silva** utilizaram a técnica neutrográfica na realização de END, tendo como fonte de nêutrons o reator de pesquisa Argonauta do IEN/CNEN [26]. Obtiveram resultados bastante relevantes na detecção de: 1) corrosões ocultas na liga de alumínio AA7075 utilizadas em aeronaves; 2) impurezas espalhadoras e absorvedoras de nêutrons em aço e lucite; 3) micro-fissuras em concreto de alta resistência; 4) materiais radioativos, explosivos, inclusões metálicas e hidrogenadas ocultas por invólucros metálicos de altas densidades atômicas. Concluíram que, apesar dos bons resultados, ainda eram esperados avanços tecnológicos, no que concerne: à implantação de um sistema transportável de nêutrons térmicos capaz de viabilizar a realização dos ensaios neutrográficos no local da irradiação; ao desenvolvimento de um sistema neutrográfico em tempo real; e à construção de uma câmera neutrográfica portátil.

Em 1996, **T. Gozani**, publicou trabalho onde foram apresentadas várias técnicas de END baseadas em inspeções com nêutrons, aplicadas na detecção de materiais ilícitos, isto é, drogas e explosivos [8]. Também foram citados diversos sistemas e equipamentos desenvolvidos a partir destas técnicas, citando as principais características e performance, em função da capacidade de detectar a presença de materiais ilícitos, nesse sentido foram apresentados os índices de acertos (85 a 95 %) e índices de falso alarme (até 30 %).

Em 1996, **T. Gozani**, apresentou no congresso sobre tecnologias de combate ao contrabando, em Santa Clara – USA, a aplicação de técnicas nucleares na detecção de materiais ilícitos [9]. Descreveu várias técnicas de END com nêutrons e as vantagens e desvantagens inerentes a cada técnica.

Em 1997, **J.S. Brenizer, H. Berger, C.T. Stebbings e G.T. Gillies** escreveram sobre o desempenho e as características de telas cintiladoras utilizadas em SEI com a técnica neutronográfica [27]. Nesse trabalho, destacaram a importância da técnica neutronográfica e de suas aplicações e a necessidade de se trabalhar com um sistema de irradiação de nêutrons transportável para tornar possível a realização de END em campo, já que muitas vezes não é possível levar o objeto a ser inspecionado até um reator. Os arranjos neutronográficos experimentais analisados foram: 1) o reator UVAR da Virginia – EUA, com intensidade de feixe de  $1,6 \cdot 10^6 \text{ n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , razão de colimação  $L/D$  de 40, razão de cádmio de 90 e taxa de exposição de raios- $\gamma$  de  $1,5 \cdot 10^5 \text{ mR} \cdot \text{h}^{-1}$  em geometria  $4\pi$ ; 2) um irradiador com fonte de Pu-Be de 5 Ci que emite aproximadamente  $5 \cdot 10^6 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 3) outro irradiador com uma fonte de  $^{252}\text{Cf}$  emitindo cerca de  $6,8 \cdot 10^9 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ . As câmeras foram montadas a  $90^\circ$ , em relação ao feixe de nêutrons, e um espelho a  $45^\circ$  refletia a imagem do cintilador em direção à câmera. Os ensaios foram realizados para cada fonte de nêutrons com diferentes cintiladores. O tempo de exposição foi determinado em função da intensidade do feixe de cada fonte. O primeiro SEI utilizava um intensificador da marca *Thonson*, modelo TH 7883 e uma câmera *Nuviscom*, marca *Precise Optics Inc*, e sistema de digitalização de 8 bits, para o qual foi obtida através da MTF, uma modulação de 90%, correspondente à frequência espacial de 0,53 *linhas/mm* para um fluxo de nêutrons mínimo de  $5 \cdot 10^4 \text{ n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . O segundo SEI utilizava um intensificador com tecnologia *Silicon Intensifier Target* (SIT), acoplado a uma câmera *Heimann XQ* – série 1335 – 1337 e um sistema de digitalização e tratamento de imagens da *LTV Corporation*, para o qual foi

obtida através da MTF, uma modulação de 90%, correspondente à frequência espacial de  $0,23 \text{ linhas/mm}$ , para um fluxo mínimo de  $10^2 \text{ n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . O terceiro SEI utilizava uma câmera refrigerada *Photometric*, modelo 7883, e um sistema de digitalização de 16 bits, para o qual foi determinada uma MTF de  $2,51 \text{ linhas/mm}$ . As respostas dos SEI relativas às diferentes telas cintiladoras utilizadas, foram comparadas em função do nível de enegrecimento (nível de cinza) em cada elemento de figura (pixel), desvio padrão e fator de eficiência quântica (QE), para o reator UVAR, e do nível de cinza, para as fontes de Pu-Be e  $^{252}\text{Cf}$ .

Em 1999, **A. X. da Silva**, demonstrou a potencialidade da neutronografia, aliada à tomografia computadorizada por transmissão, para a detecção de narcóticos e explosivos ocultos por diversos materiais [14]. Foram reconstruídas imagens tomográficas, a partir de ensaios experimentais de neutronografias realizadas no arranjo instalado no reator Argonauta do IEN/CNEN, e também a partir de simulações realizadas com o código MCNP – 4B. Na reconstrução das imagens tomográficas utilizou-se o algoritmo (ARIEM) baseado no princípio de entropia máxima, reconstruindo satisfatoriamente imagens com apenas 6 projeções e 103 abscissas. A conclusão foi de que as reconstruções tomográficas com nêutrons térmicos, de uma forma geral, puderam caracterizar bem a presença de uma certa quantidade de droga e explosivo, quando submetidos a ocultação por alumínio, chumbo e tecido de algodão.

Em 1999, **L. R. Hacidume** realizou trabalho visando demonstrar a potencialidade da técnica neutronográfica, aliada à tomografia computadorizada por transmissão, para a detecção e visualização de amostras contendo explosivos plásticos [18]. Os ensaios experimentais foram realizados no arranjo instalado no canal J-9 do reator Argonauta do IEN/CNEN. As imagens neutronográficas obtidas com filmes radiográficos convencionais foram digitalizadas utilizando-se um *scanner* de mesa. Para a reconstrução das imagens tomográficas, utilizou-se o algoritmo ARIEM para um conjunto de seis projeções, executadas em incrementos angulares de  $30^{\circ}$ . Como resultado, Hacidume concluiu que, a partir da análise qualitativa das imagens, o sistema foi capaz de detectar satisfatoriamente a amostra de explosivo, enquanto a análise quantitativa comprovou a efetividade da digitalização dos dados, através de um *scanner*, para fins apenas de reconhecimento.

Em 1999, **A X. da Silva, V.R. Crispim e L. R. Hacidume** utilizaram um sistema neutrongráfico aliado à tomografia computadorizada usando feixes de nêutrons térmicos, para a visualização de drogas e explosivos mesmo quando ocultos por materiais pesados [28]. Nos ensaios radiográficos, foram inspecionadas amostras de cocaína em pó e explosivos, ocultos por diversos materiais. As amostras foram irradiadas no canal J-9 do reator Argonauta do IEN, sendo utilizadas duas folhas conversoras de gadolínio com espessura de  $25 \mu\text{m}$  cada e filme radiográfico *Kodak Industrex A5* para registro das imagens neutrongráficas. As imagens tomográficas com nêutrons térmicos foram comparadas com aquelas obtidas a partir de projeções com exposição a raios  $X$  de  $135 \text{ keV}$  e nêutrons de  $2 \text{ MeV}$ . A tomografia com nêutrons térmicos demonstrou ser superior às demais.

Em 2000, **A X. da Silva e V.R. Crispim** realizaram simulações computacionais tomando como base um sistema neutrongráfico transportável com baixo fluxo utilizando o radioisótopo  $^{252}\text{Cf}$  e apresentaram estudos relativos a alguns materiais levando em consideração a eficiência de moderação térmica e a razão de colimação [29]. O código de transporte de partículas, o *Monte Carlo N-Particle* (MCNP-4b), foi utilizado para o modelagem tendo a maximização e a uniformização do fluxo de nêutrons térmicos no plano de imagem e a resolução da imagem neutrongráfica como meta na otimização dos parâmetros neutrongráficos. Concluíram que os materiais moderadores de melhor desempenho foram obtidos com o polietileno de alta densidade, a parafina, o hidreto de zircônio e a água leve. O polietileno de alta densidade foi o moderador mais eficiente, apresentando um fator de termalização de  $56 \text{ cm}^2$ , com o fluxo máximo de nêutrons térmicos ocorrendo a  $1,5 \text{ cm}$  da fonte. Para uma inspeção onde se desejava obter neutrongrafias de boa qualidade para mostrar detalhes de uma amostra, sem restrição quanto ao tempo de exposição ao feixe neutrônico, consideraram uma razão de colimação  $L/D$  de 50 (resolução geométrica de  $0,2 \text{ mm}$ ), para uma taxa de emissão da fonte de  $1,17 \cdot 10^{11} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $50 \text{ mg}$  de  $^{252}\text{Cf}$ ), com o tempo de exposição estimado em 90 minutos. Numa inspeção menos detalhada, o tempo de exposição estimado foi de 5 minutos, para uma configuração cujo maior fluxo normalizado de nêutrons térmicos, no plano de imagem, correspondesse a  $6 \cdot 10^{-6} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  e a razão de colimação,  $L/D$  de 7,5.

Em 2000, **M. O de Menezes** desenvolveu um sistema neutrongráfico em tempo real, que foi instalado em um dos canais de irradiação do reator IEA-R1 do IPEN [30]. Neste sistema, foram utilizados uma tela conversora de  $Gd_2O_2S(Tb)$ , acoplada a um intensificador de luz (*LIXI*), uma câmera de vídeo *Javelin Systems*, modelo JE8242, uma placa digitalizadora *Targa 1000* de 8 bits e um microcomputador, no qual as imagens obtidas foram processadas, mediante emprego de programa computacional específico. Como fonte de nêutrons, foi utilizado o reator IEA-R1 que fornece um fluxo de nêutrons de  $1 \cdot 10^6 n \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$ , numa razão de colimação,  $L/D$  de 70, razão  $n/\gamma$  de aproximadamente  $10^6 n \cdot cm^2 \cdot s^{-1} \cdot mRem$  e energia efetiva dos nêutrons de  $7 meV$ . Objetivaram obter imagens em tempo real e demonstrar a viabilidade do sistema de realizar tanto ensaios estáticos como dinâmicos. Como resultado foi obtido um valor médio de sensibilidade de  $0,07 cm$  em *lucite*, resolução de  $440 \mu m$  para o qual foi obtida, através da MTF, uma modulação de 90%, correspondente à frequência espacial de  $0,3 linhas/mm$ . Apesar de obterem bons resultados, foram apresentadas algumas propostas para a melhoria do sistema, tais como automatizar o sistema de foco e de iluminação da câmera de vídeo e utilizar uma placa de vídeo que permita a realização do processamento da imagens em tempo real.

Em 2000, **S. Koerner, E. Lehmann e P. Vontobel** realizaram ensaios neutrongráficos para o desenvolvimento e otimização de um SEI com câmeras CCD, utilizando uma tela cintiladora sensível a nêutrons, um espelho refletor e uma câmera CCD [31]. Esses equipamentos foram montados dentro de uma caixa de alumínio à prova de luz. Os primeiros testes serviram para qualificar o SEI, comparando os diversos componentes e levantando as propriedades de cada um, até obter o melhor resultado, o que ocorreu com os seguintes componentes: câmera CCD *Astrocam* refrigerada com nitrogênio líquido, com tubo intensificador de imagem *SIT (SI 502 A/T)* e um processador de imagem com formato  $(24 \times 24) mm^2$  e lente *Nikon NOKT 58 mm F 1,2*, uma placa de aquisição de imagem de 16 bits de digitalização (65.535 tons de cinza), espelho de  $2 mm$  de espessura de vidro com refletor de alumínio e um cintilador fabricado por *Levy Hill (ZnS(Ag)<sup>6</sup>LiF)*. Esses componentes foram montados em uma caixa preta a prova de luz com  $(26 \times 26) cm^2$ . O detector demonstrou ter excelente linearidade e sensibilidade. As exposições com este arranjo foram de 10 segundos para cada imagem, sendo necessárias de 1 a 2 horas para se obter uma tomografia completa.



Em 2001, **S. Koerner, B. Schillinger, P. Vontobel e H. Rauch** descreveram o desenvolvimento de um sistema tomográfico com nêutrons, destacando a importância dessa técnica de imageamento e suas diferenças em relação aos raios X [32]. O sistema desenvolvido foi instalado no reator TRIGA Mark II do *Atominstitut of the Austrian Universities*, que opera a uma potência de 250 kW, fornecendo um fluxo de nêutrons de  $1,3 \cdot 10^5 n \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$ . O sistema tomográfico desenvolvido possui uma mesa tomográfica acionada por motor de passos, um sistema eletrônico para obtenção de imagens neutronográficas, um programa computacional que fazia o controle de sincronismo entre o sistema de imageamento e a mesa tomográfica, além do gerenciamento dos dados. Descreveram também os processos de tratamento das imagens neutronográficas de onde foram obtidos os dados necessários para reconstrução tomográfica, tais como correção de *white spot* causados pelos raios- $\gamma$ , correção de danos por ruídos, correção de artefatos, seleção da área de interesse, cálculo da seção de choque, ordenação dos dados e algoritmo de reconstrução. O sistema tomográfico foi capaz de obter imagens neutronográfica em 20 segundos e a reconstrução de tomografia 3D em um 1 dia de trabalho.

Em 2002, **H. Kobayashi, I. Kobayashi, M. Satoh, H. Morishima** divulgaram um estudo sobre um material óptico estimulador de luminescência usado em telas cintiladoras de sistemas de imageamento [33]. Testes com diversos materiais foram realizados, através da deposição de pó de  $Gd_2O_3$  em folha de plástico com  $Al_2O_3:C$ , com o objetivo de melhorar a dependência da sensibilidade com a temperatura e os efeitos de fadiga. Imagens neutronográficas de boa sensibilidade e linearidade foram obtidas e, como principal resultado deste trabalho ressaltaram o grande aumento da estabilidade térmica dos materiais utilizados. Esse tipo de material já está sendo comercializado pela *Fuji Photo Co.*

Em 2002, **A. L. Popov, D. A. A. Myles, F. Dauvergne, C. Wilkinson** desenvolveram uma técnica de deposição de fósforo em placas de imageamento com nêutrons [34]. Consiste de um filme onde é disperso um fino depósito de cristais de fósforo (ex.  $BaFBr:Eu^{2+}$ ) em uma fita orgânica sobre um suporte plástico. Durante a irradiação os íons de fósforo eram excitados e, posteriormente, ao serem excitados pela luz visível, produziam um efeito luminescente. Através da exposição da placa de imageamento com um focalizador laser e, simultaneamente, pela detecção da luz luminescente, a informação era armazenada no filme de fósforo. Essa imagem podia ser apagada por exposição intensa

de luz. Desse modo, a placa de imageamento podia ser reutilizada. Através da mistura de  $Gd_2O_3$ , o depósito de fósforo pode ser sensibilizado por nêutrons térmicos.

Em 2002, **K. Mochiki, Y. Ikedo, Y. Murata, K. Nittoh, C. Konagai** divulgaram o desenvolvimento de um novo cintilador para a *Toshiba Co.* [35]. Um cintilador de  $Gd_2O_2S$  foi dopado com európio, para que 99 % dos nêutrons térmicos incidentes fossem capturados dentro dele. Verificaram que este novo cintilador emitia principalmente fótons luminosos com comprimento de onda característicos da região do vermelho. Os primeiros resultados obtidos mostraram, pelo espectro de intensidade de luz emitida, que a componente vermelha era a mais intensa, tendo um brilho maior do que o das outras componentes (verde e azul), sendo apropriada para visualização de materiais com alta absorção de nêutrons. O segundo em maior intensidade era a componente verde, sendo mais apropriada para a visualização de materiais com seção de choque de absorção intermediária. A componente azul que apresentou menor intensidade, seria mais apropriada para a visualização de materiais com baixa seção de choque de absorção. Para se discriminar as componentes de diferentes comprimentos de onda presentes na mesma imagem, isto é, vermelha, verde e azul foram utilizadas técnicas de processamento digital.

Em 2002, **S. Srisatit, A Pattarasumunt, P. Siritiprussamee, N. Ratanapirojkajee** adaptaram um arranjo neutronográfico com um SEI para fins de tomografia computadorizada. A primeira parte do equipamento era composta de um sistema neutronográfico com SEI e um dispositivo de rotação dotado de controle remoto. A segunda parte consistia de um vídeo cassete gravador de imagem, um monitor e um micro-computador com placa para captura de vídeo. O programa computacional específico para a aquisição de dados do quadro integral executou as funções de capturar, restaurar, somar e tirar uma média das imagens.

Em 2002, **H. Asano, N. Takenada, T. Fujii, E. Nakamatsu, Y. Tagami, K. Takeshima** publicaram um artigo científico sobre a aplicação de arranjos neutronográficos com SEI, para fins de análise sobre a distribuição da fração de vazio em segmento de fluxo bifásico de líquido-gás [36].

Em 2002, **K. Kato, Y. Ikeda** estudaram a influência dos nêutrons espalhados e dos raios  $\gamma$  nas imagens obtidas com arranjos neutronográficos com SEI [37]. A influência dos nêutrons espalhados e dos raios  $\gamma$  emitidos pelos objetos inspecionados e pela blindagem

revelou-se significativa, sendo a principal causa de sombreamento nas imagens neutrongráficas. Nesse caso, os raios espalhados eram detectados por vários materiais expostos, mediante o uso de telas conversoras. Para determinar essa influência, vários testes foram realizados com diversos materiais espalhadores, sendo que, no arranjo, a tela cintiladora foi posicionada entre o feixe emergente de nêutrons e o objeto, com a face sensível voltada para o feixe de nêutrons espalhados e de raios- $\gamma$ . Os melhores resultados foram obtidos para 4 *mm* de espessura de água.

Em 2003, **F.J.O. Ferreira** realizou trabalho visando a implantação de um sistema eletrônico para a aquisição de imagens neutrongráficas no reator Argonauta do IEN/CNEN [19]. Foram feitas análises e comparações entre ensaios neutrongráficos realizados no referido reator e no reator IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), que dispõe de um sistema em tempo real, e também estudos de diversos sistemas utilizados em outros laboratórios. Concluiu que o arranjo neutrongráfico do IEN estava qualificado em termos de resolução, sensibilidade e intensidade de fluxo de nêutrons para realizar ensaios neutrongráficos em tempo real, utilizando-se um sistema eletrônico de imageamento.

Em 2004, **T. Gozani** destacou a importância da aplicação de ensaios não destrutivos com nêutrons na inspeção de explosivos. Segundo Gozani tecnologias empregadas, tais como radiografia com raios X e com raios  $\gamma$  além da detecção por traços e vapor, são muito deficientes. Para se tornarem efetivas, as tecnologias empregadas devem reunir algumas características, tais como: sensibilidade ao material especificado, rapidez, flexibilidade e respostas automáticas. Ressaltou que, para combater o terrorismo e o narcotráfico será necessário a implementação de inspeções que utilizem tecnologias mais apropriadas. As técnicas nucleares, em função do grande poder de penetração das radiações utilizadas, têm demonstrado possuir qualidades essenciais a um sistema de detecção de explosivos e narcóticos, por permitirem inspecionar grande quantidade de amostras com relativa rapidez, sensibilidade, especificidade e decisão automatizada. Foram apresentados resumos sobre as principais técnicas nucleares aplicadas e sistemas desenvolvidos utilizando estas técnicas [6].

Em 2004, **W.J. Richards, M.R. Gibbons, K.C. Shields** descreveram o desenvolvimento de um sistema tomográfico com nêutrons e suas aplicações [38].

Destacaram a importância dos END realizados com nêutrons e suas habilidades únicas na inspeção de certos elementos e isótopos. A principal aplicação do sistema desenvolvido era a determinação da concentração de hidrogênio (< 200 ppm) em certas ligas metálicas, tais como o titânio utilizado em compressores de turbinas de aviação. Citaram a necessidade do pré-processamento das imagens obtidas, visando a melhoria da resolução espacial, do cancelamento de degradações causadas por ruídos espúrios e do cálculo do coeficiente de atenuação, além da necessidade do pós-processamento, em termos de alinhamento das imagens obtidas, da determinação do centro de massa para, posteriormente, submeter os dados ao *programa computacional* de reconstrução.

Em 2005, **J. E. Eberhardt e outros** descreveram o desenvolvimento de um sistema para detecção de drogas e explosivos em container [39]. O sistema utiliza uma combinação de neutrografia com nêutrons rápidos e radiografia com raios gama, produzindo imagens de alta resolução, sendo necessário um tempo de 1 a 2 minutos para se inspecionar uma amostra. Nesse trabalho os autores destacam a limitação dos sistemas de raios X para este tipo de aplicação.

Em 2005, **Haidong Wang e outros** realizaram um estudo sobre a aplicação de Redes Neurais Artificiais visando a detecção de explosivos, a partir da técnica de análise por ativação com nêutrons térmicos, (do inglês " *Pulsed Fast Neutron Analysis* " PTNA) [40]. Descreveram a utilização de Redes Neurais Artificiais " *Multilayer Perception* ", com método de treinamento " *Back-Propagation* ", sendo empregados diversos algoritmos, tais como: " *Gradiente Descent with Adaptive learning rate* " (GDA), " *Resilient Back-Propagation* " (RP), " *One-Step Secant* " (OSS) e outros. Os resultados obtidos no treinamento das RNA foram: taxa média de falso positivo de 4,66 % e taxa média de falso negativo de 6,70 %, o que implica em uma taxa média de erros em torno de 11,36 % ou taxa média de acertos 88,64%.

Em 2006, **W. V. Nunes** usou técnicas de inteligência artificial utilizando redes neurais para a detecção de minas terrestres por meio de radiação penetrante. Neste trabalho foram utilizados os espectros em energia gerados pelo código MCNP, espectros em energia, como dados de entrada e saída para treinamento de diversas redes neurais. Utilizando o código NeuroShell 2.0 utilizou diversas arquiteturas e padrões distintos de redes, sendo os melhores resultados obtidos em redes baseadas no modelo múltiplas

camadas “*Multilayer Perceptron*” (MLP), com três camadas e treinamento supervisionado por retropropagação [10].

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### II.1 – NÊUTRONS E A MATÉRIA

##### II.1.1 – Interação de Nêutrons com a Matéria

Por serem eletricamente neutros, os nêutrons praticamente não interagem com os elétrons orbitais dos átomos que constituem a matéria, não sendo afetados pelos campos eletrostáticos produzidos pela eletrósfera e núcleo. Dessa forma, os nêutrons passam através das camadas eletrônicas dos átomos e vão interagir diretamente com os núcleons dos núcleos dos átomos. Têm um grande poder de penetração em certos materiais, que se deve, em grande parte, a essa neutralidade elétrica, podendo ser detectado indiretamente, por meio de reações nucleares que geram como produtos radiações secundárias.

A interação nêutron-núcleo pode ocorrer principalmente por dois processos, conforme apresentado na Figura II.1.

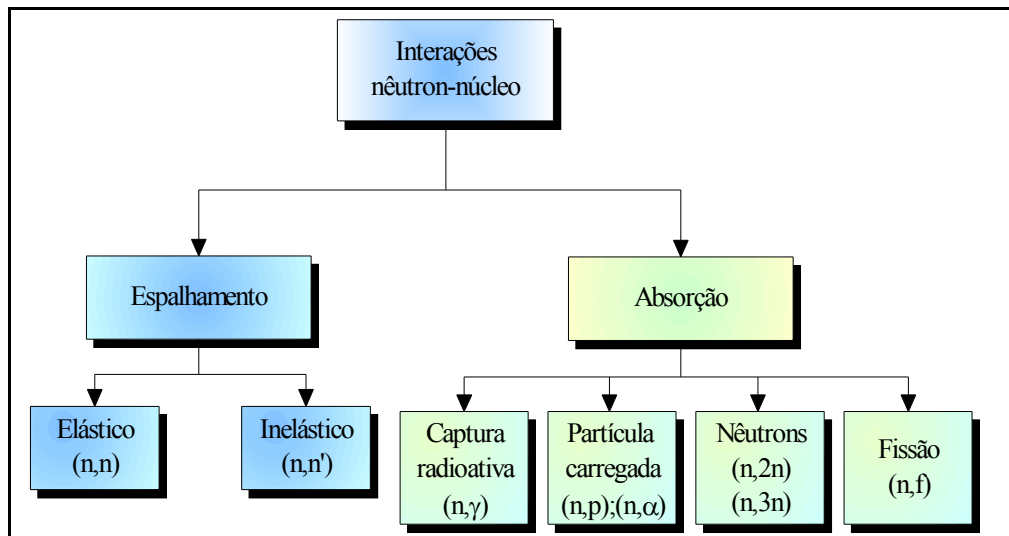


Figura II.1- Possíveis interações dos nêutrons com a matéria [41]

1) Espalhamento – O nêutron sofre colisão com o núcleo alvo, transferindo parte de sua energia para esse, e é espalhado em uma outra direção, podendo ocorrer de duas maneiras:

✓ Espalhamento elástico (n,n) - a estrutura nuclear não sofre alterações e a interação é uma simples transferência de energia cinética e de quantidade de movimento. Nenhuma

energia é transformada em radiação eletromagnética. Neste processo, o nêutron reaparece e o núcleo é deixado no estado fundamental. O espalhamento elástico é o principal responsável pela moderação dos nêutrons.

✓ Espalhamento inelástico  $(n, n')$ ,  $(n, n'\gamma)$  – o nêutron incidente deve possuir energia superior a um certo limiar; um outro nêutron, com energia menor que o nêutron incidente, é emitido pelo núcleo composto, que atinge o seu estado fundamental emitindo, na maioria das vezes, raios  $\gamma$ . Nas reações onde ocorrem o espalhamento inelástico, a energia cinética do sistema não se conserva e parte dela é utilizada como energia de excitação nuclear.

2) Absorção – O nêutron é capturado pelo núcleo alvo, formando um núcleo composto em um estado energeticamente excitado que atinge a estabilidade pela emissão de um ou mais fótons ou de partículas. A partir do estado excitado do núcleo, vários fenômenos podem ocorrer, sendo os principais:

✓ Captura radioativa  $(n,p)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, \gamma)$  ou  $(n,\alpha)$  ocorre com nêutrons incidentes de energia intermediária. O núcleo composto é formado em um estado energeticamente excitado, que atinge a estabilidade emitindo um ou mais fótons ou partículas.

✓ Fissão nuclear – O núcleo de um material fissionável, tal como  $^{235}\text{U}$ , absorve um nêutron e divide-se em dois fragmentos, nêutrons rápidos (em média 2,5) e uma considerável quantidade de energia (em média 200 MeV), que aparece na forma de energia cinética dos produtos da fissão [42].

Como resultado da peculiaridade de suas interações, os nêutrons podem ser classificados de acordo com sua energia cinética, conforme apresentado na Tabela II.1.

Tabela II.1- Classificação dos nêutrons em função da energia [42]

CLASSIFICAÇÃO	FAIXA DE ENERGIA
Nêutrons lentos	$0 < E < 10^4$ (eV)
Nêutrons frios	$E < 0,01$ (eV)
Nêutrons térmicos	$0,01 < E < 0,3$ (eV)
Nêutrons epitérmicos	$0,3 < E < 10^4$ (eV)
Nêutrons rápidos	$10^4$ (eV) $< E < 20$ (MeV)
Relativístico	$E > 20$ (MeV)

A seção de choque para nêutrons em relação a um dado material é definida como a probabilidade de interagirem, por unidade de fluência de nêutrons e por centro de interação do material (núcleo). Quanto maior essa seção de choque, maior a probabilidade de ocorrer algum tipo de interação. A unidade de seção de choque microscópica é o barn ( $b$ ) e está relacionada com a área aparente que um núcleo apresenta para que ocorra uma dada interação com o nêutron, isto é  $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ , assim sendo, quanto maior a área do alvo que o núcleo apresenta, maior a chance do nêutron causar a reação, sendo de maior importância, a energia do nêutron incidente e a natureza do núcleo alvo. Por exemplo, a seção de choque de absorção para alguns materiais é inversamente proporcional a velocidade ( $v$ ) do nêutron, para baixas energias (lei  $1/v$ ). Além disso, picos de absorção podem ocorrer em certas energias, em decorrência de ressonâncias que ocorrem quando a energia do nêutron incidente é igual a um nível particular de energia do núcleo alvo [42].

A seção de choque microscópica total,  $\sigma_t$ , é igual a soma das seções de choque microscópicas de absorção,  $\sigma_a$ , e de espalhamento,  $\sigma_s$ , isto é,

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s \quad \text{II.1}$$

Cada uma dessas seções de choque parciais pode ser subdividida em vários componentes, correspondentes aos processos de absorção e espalhamento, como no caso de  $\sigma_a$ :

$$\sigma_a = \sigma_{cr} + \sigma_f + \dots \quad \text{II.2}$$

onde:

$\sigma_{cr}$  - seção de choque microscópica de captura radioativa;

$\sigma_f$  - seção de choque microscópica de fissão.

Cada modo de interação compete com outros. Logo, a fração de colisões que resulta numa reação particular dependerá da seção de choque relativa para a reação envolvida. No entanto, em certas energias, algumas das interações não ocorrem ou são desprezíveis, não sendo consideradas na seção de choque total.



### II.1.2 – Atenuação dos Nêutrons

A atenuação de um feixe de nêutrons por um determinado material é do tipo exponencial, sendo geralmente maior para nêutrons térmicos e epitérmicos do que para nêutrons rápidos. As características de atenuação dos nêutrons com diferentes energias determinam diversas aplicações em radiografia com nêutrons. Os nêutrons térmicos são os mais utilizados em radiografia com nêutrons, por serem mais facilmente detectáveis e por apresentarem características favoráveis de atenuação [26].

Na Figura II.2 são apresentados os coeficientes de atenuação em massa, em função do número atômico do núcleo alvo. Como se pode observar, a probabilidade de interação de um nêutron com 25 meV versus material alvo depende do nuclídeo em particular e não tem um comportamento contínuo como os fótons de raios X com 100 keV, que aumenta com o número atômico do nuclídeo.

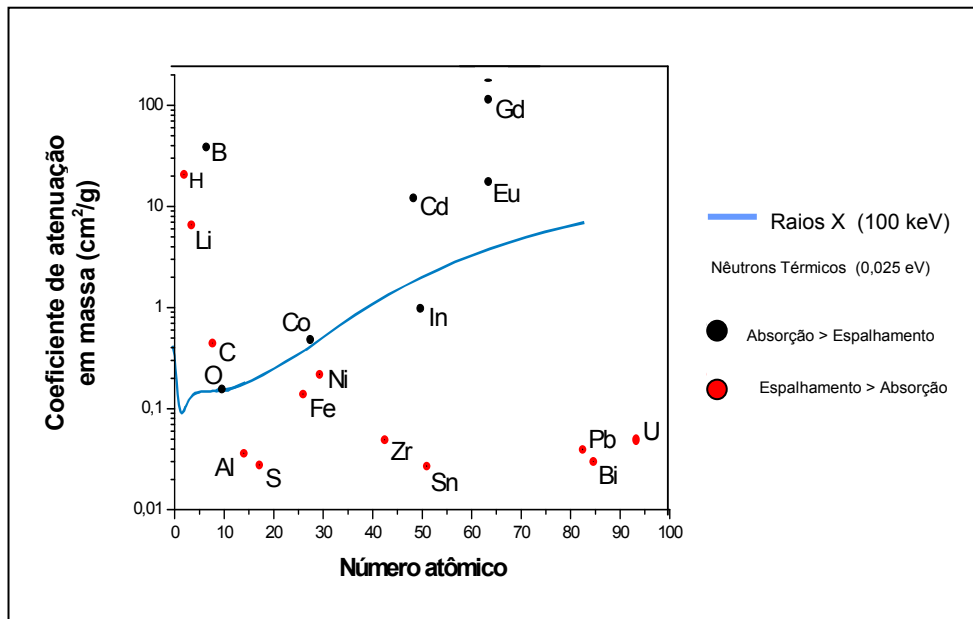


Figura II.2- Coeficientes de atenuação em massa para nêutrons térmicos e raios X de 100 keV referentes a alguns materiais [43]

Do ponto de vista macroscópico, pode-se estudar a interação de nêutrons com a matéria, através da atenuação de um feixe colimado ao atravessar um material de espessura,  $x$ , e  $\Sigma_t(\nu)$ , que representa a probabilidade dos nêutrons com velocidade,  $\nu$ , sofrerem um espalhamento ou captura por unidade de distância percorrida, denominada “Seção de Choque Macroscópica Total”, sendo expressa por:

$$\Sigma_T(\nu) = N\sigma_T(\nu) \quad \text{II.3}$$

onde:

$N$  – densidade atômica do material (número de átomos por  $cm^{-3}$ );

$\sigma_T$  - seção de choque microscópica total de elemento do material alvo, para energia  $E$  do nêutron, em barn ( $10^{-24} cm^2$ ).

A fração relativa de nêutrons removidos do feixe por qualquer interação  $d\phi/\phi$ , em um caminho percorrido,  $dx$ , no material é:

$$\frac{d\phi}{\phi} = -\Sigma_T(v)dx \quad \text{II.4}$$

O fluxo neutrônico transmitido,  $\phi$ , pode ser expresso por:

$$\phi = \phi_0 e^{-\Sigma_T(v)x} \quad \text{II.5}$$

$$T = \frac{\phi}{\phi_0} = e^{-\Sigma_T(v)x} \quad \text{II.6}$$

sendo  $\phi_0$  o fluxo de nêutrons incidentes no material e  $T$ , a transmissão.

Devido à forte atenuação dos nêutrons térmicos em hidrogênio, a inspeção de materiais hidrogenados é uma das maiores potencialidades da utilização dos nêutrons em relação aos raios X, conforme foi apresentado na Figura II.2. Materiais explosivos plásticos ou líquidos, assim como alguns tipos de drogas como a cocaína e seus derivados, quando encapsulados em metais pesados, como o chumbo, torna a inspeção com nêutrons indispensável. A Tabela II.2 apresenta a composição química, densidade e seção de choque microscópica total de alguns desses materiais.

Tabela II.2- Composição química de algumas drogas e explosivos [5] [14]

Substância de interesse	Composição química	Densidade ( $g.cm^{-3}$ )	Seção de choque (barns)
COCAÍNA	$C_{17} H_{21} NO_4$	0,94	30
NITRATO DE AMÔNIA	$H_4 N_2 O_3$	1,66	22
NITROGLICERINA	$C_3 H_5 O_9 N_3$	1,59	9
PETN	$C_5 H_8 O_{12} N_4$	1,77	15
RDX	$C_4 H_6 O_6 N_6$	1,83	18
TNT	$C_7 H_5 O_6 N_3$	1,65	16

Os explosivos plásticos Semtex e C-4 são formados por compostos derivados de outros explosivos, por exemplo o Semtex A: 94,3 % de PETN com 5,7 % de RDX; e o C-4: 91 % de RDX [44].

## II.2 – FONTES DE NÊUTRONS

Os reatores nucleares, os aceleradores e as fontes radioisotópicas, são as fontes de nêutrons indicadas para a realização de neutrografias. A intensidade, o espectro de energia dos nêutrons e o sistema colimador são parâmetros determinantes que especificam o tempo de exposição e a eficiência de formação de uma imagem de boa resolução. O custo e a complexidade, tanto na construção e de operação, a portabilidade e a otimização das blindagens (proteção radiológica) também devem ser considerados. Os nêutrons emitidos por qualquer uma dessas fontes devem ser moderados para os propósitos da neutrografia térmica, pois é nessa faixa de energia que os conversores dos sistemas de imageamento se mostram mais eficientes. A Tabela II.3 apresenta as características dessas fontes e permite uma análise comparativa entre elas.

Tabela II.3 - Características das Fontes de Nêutrons

TIPO DE FONTE	DENSIDADE DE FLUXO ( $n.cm^{-2}.s^{-1}$ )	RESOLUÇÃO RADIOGRÁFICA	TEMPO DE EXPOSIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Reator Nuclear	$10^5$ a $10^8$	Excelente	Curto	Operação complexa e estável, custo de investimento entre médio e alto, não portátil.
Acelerador de partículas	$10^3$ a $10^6$	Média	Médio	Operação liga-desliga, custo e investimento médio, portabilidade possível.
Radioisótopo	$10^1$ a $10^4$	Baixa a média	Longo	Operação fácil e estável, baixo custo.

Serão abordados apenas os reatores nucleares, por serem o único tipo de fonte utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Os reatores nucleares são de alto custo e complexidade de construção e operação e fornecem feixes de nêutrons bastante atrativos ao desenvolvimento de ensaios neutrongráficos [45]. A principal vantagem está no alto fluxo neutrônico, que proporciona a realização de exposições neutrongráficas relativamente curtas; em compensação, disponibilizam também um fluxo de raios  $\gamma$ , daí a importância da fonte dispor de alta razão  $n/\gamma$ . A alta intensidade de nêutrons na entrada do colimador ( de  $10^{10}$  a  $10^{13}$   $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ ) viabiliza a obtenção de um feixe bem colimado ( $10^4$  a  $10^9$   $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$  no plano da amostra), e portanto, de neutrongrafias de alta resolução.

Como a maioria dos reatores utilizados para a neutrongrafia, são também empregados para outras finalidades, o custo por hora de operação, é cerca de 20 a 25 vezes menor do que com um acelerador [43].

Em um reator nuclear de pesquisa típico, o material físsil, tal como o  $^{235}\text{U}$ , é disposto no núcleo do reator, que é inserido em um meio moderador, sendo ambos contidos por uma blindagem biológica de concreto. Da fissão de cada núcleo de  $^{235}\text{U}$  resultam, além dos fragmentos de fissão, a emissão de partículas carregadas, raios- $\gamma$  e de 2 a 3 nêutrons com energia em torno de 2  $\text{MeV}$ . Esses nêutrons são termalizados através de colisões elásticas no meio moderador, atingindo energias cinéticas médias da ordem de 0,025  $\text{eV}$ , que são capazes de induzir novas fissões. Para controlar a reação de fissão nuclear em cadeia, são inseridas barras de controle no núcleo do reator, onde a remoção do calor gerado no processo é realizado por sistema de refrigeração, mantido pela circulação de água. Para se dispor dos nêutrons térmicos, canais de irradiação são inseridos na blindagem de onde se extraem feixes neutrônicos alinhados. Ao se instalar canais radiais ou tangenciais em relação ao núcleo, eles se caracterizam pela razão de colimação,  $L/D$ , que define a qualidade da imagem neutrongráfica, em termos de resolução geométrica.

### ***II.3 - ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)***

O termo Ensaio Não Destrutivo (END) é aplicado a uma série de técnicas de medidas nas quais o estado físico ou químico dos materiais, presentes na amostra, não sofrem alteração. Os END além de diminuir a exposição (riscos) para o operador são muito mais rápidos do que um ensaios químico, por exemplo, porém não tem a acurácia

dos ensaios químicos [46]. O desenvolvimento dos END reflete a necessidade da sociedade de automatizar suas atividades diminuindo a força de trabalho, sendo aplicados em diversas áreas, tais como: indústria, controle de processos, medicina. Na área nuclear, são utilizados na inspeção e controle de materiais nucleares, condições de criticalidade e técnicas de imageamento baseadas na transmissão da radiação pela matéria.

### ***II.3.1 – Técnica Neutronográfica***

#### ***II.3.1.1 – Princípios Básicos***

A Neutronografia é uma técnica adequada para se visualizar o interior de uma amostra e se baseia no princípio da atenuação de um feixe de nêutrons, quando atravessa a matéria, dependendo do material e da geometria da amostra. A interação dos nêutrons não é caracterizada por um modelo de dependência com o número atômico ( $Z$ ) do material da amostra, como acontece com os raios  $X$ . Portanto, a probabilidade de atenuação dos nêutrons por unidade de percurso em um determinado material difere daquela para raios  $X$ , como mostra a Figura II.2. Conseqüentemente, a neutronografia e a radiografia com raios  $X$  são capazes de visualizar de forma diferente esses materiais.

Ao contrário dos raios  $X$ , os nêutrons são atenuados por alguns materiais leves, como hidrogênio, boro e lítio, mas são capazes de penetrar materiais pesados, como o chumbo, e de distinguir isótopos e elementos com números atômicos próximos. A atenuação de um feixe neutrônico segue a lei exponencial, podendo ser expressa por:

$$\phi = \phi_0 e^{-\Sigma_t d} \quad \text{II.7}$$

onde :

$\phi$  - é o fluxo de nêutrons transmitidos através do objeto que atingem o detector;

$\phi_0$  - é o fluxo de nêutrons emergentes do colimador que incidem sobre o objeto;

$d$  - é a espessura da amostra;

$\Sigma_t$  - é a seção de choque macroscópica total do material inspecionado.

O contraste neutronográfico entre materiais nas imagens obtidas é função da diferença entre as seções de choque dos materiais constituintes. Por isso, quando se realiza um ensaio neutronográfico com nêutrons térmicos de amostras contendo

hidrogênio em sua composição, sua imagem é revelada, mesmo quando encapsulado por metais pesados, como chumbo e aço.

Um arranjo neutrongráfico experimental básico consiste de uma fonte de nêutrons, um colimador, o objeto a se inspecionar e um detector plano. O objeto é posicionado entre a saída do colimador e um detector, que registra imagem bi-dimensional (2D) do objeto. Essa imagem contém informações sobre a intensidade do feixe de nêutrons que foi atenuado ao atravessar o objeto, dependendo da composição e estrutura interna dele, conforme se observa no esquema apresentado na Figura II.3.

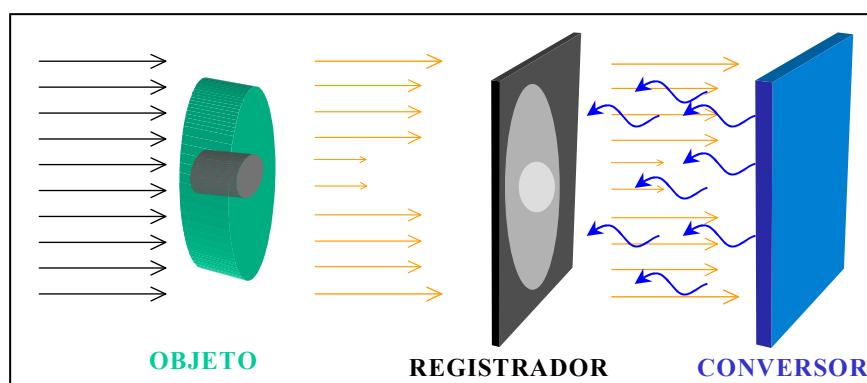


Figura II.3 – Princípio básico da técnica neutrongráfica utilizando filme

Conforme se descreveu no item II.2 o feixe de nêutrons pode ser extraído de um reator nuclear, de uma fonte radioativa ou de um acelerador. Os fatores determinantes para a escolha da fonte são: intensidade e energia dos nêutrons produzidos; intensidade e energia da radiação  $\gamma$ ; custo; tamanho; portabilidade e blindagem necessária [43].

Para se registrar as imagens neutrongráficas, podem ser utilizados filmes argênteos, detectores de traços nucleares e Sistemas Eletrônicos de Imageamento (SEI), que permitem a inspeção em tempo real. Os dois primeiros proporcionam uma boa resolução e alta sensibilidade, mas requer um tempo maior de inspeção, por causa do processo de revelação do detector. Por outro lado, para se observar eventos dinâmicos e testar muitas amostras, o terceiro é o mais adequado. Neste trabalho, serão abordadas apenas as características de um SEI, por ser o tipo utilizado.

### II.3.1.2 – Neutronografia com Sistema Eletrônico de Imageamento (SEI)

Com o desenvolvimento e otimização dos conversores cintiladores, de técnicas de construção de telas conversoras de alta eficiência e de câmeras com tecnologia CCD de alta sensibilidade, os pesquisadores, que já dominavam a técnica neutronográfica convencional, começaram a desenvolver sistemas eletrônicos de aquisição de imagens.

No imageamento eletrônico, a visualização é feita mediante um sistema de câmera de vídeo e monitor, que podem ser acoplados a sistemas auxiliares, tais como videocassete e computadores, que permitem o arquivamento e o processamento digital da imagem.

Um equipamento de radiografia com SEI possui basicamente as mesmas partes de um sistema convencional que emprega filmes; a diferença fundamental está no sistema de imageamento. Um SEI para Neutronografia possui os componentes [30]: tela cintiladora, câmera de vídeo, placa digitalizadora, micro-computador. Nesse arranjo neutronográfico, os principais componentes, responsáveis pela conversão nêutrons-sinal de vídeo, são dispostos no interior de uma caixa blindada à prova de luz, conforme se apresenta na Figura II.4.

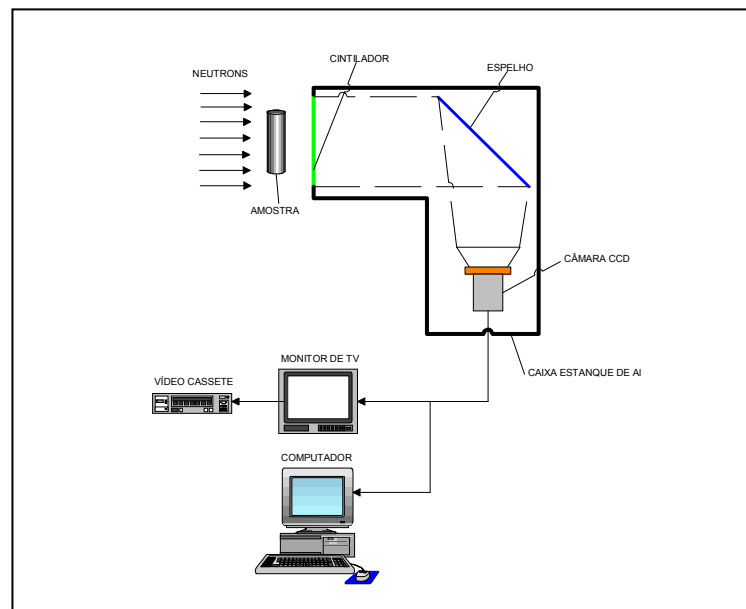


Figura II.4 - Sistema Eletrônico de Imageamento

- *Tela Cintiladora*

É responsável pela conversão do feixe de nêutrons modulado pela amostra em um feixe de luz modulado. A mais utilizada é composta por um material conversor de nêutrons em radiação secundária misturado a um fósforo fluorescente. Uma tela conversora/cintiladora para ser empregada em um SEI deve apresentar as seguintes características [30]:

- ✓ Alta seção de choque para absorção de nêutrons térmicos;
- ✓ baixo coeficiente de atenuação para raios  $\gamma$ ;
- ✓ alta eficiência de conversão nêutron-luz;
- ✓ alta transparência à luz emitida;
- ✓ alta resolução espacial.

Geralmente, os conversores cintiladores para Neutronografia são constituídos de elementos com alta seção de choque para absorção de nêutrons, tais como o lítio, o boro e o gadolínio. Os dois primeiros elementos emitem partículas  $\alpha$  (alfa) de alta energia ao absorverem nêutrons. A Tabela II.4 apresenta um resumo das características dos materiais conversores mais utilizados em telas cintiladoras.

Tabela II.4– Características de materiais conversores utilizados em telas cintiladoras [43].

MATERIAL	COMPOSIÇÃO TÍPICA DA TELA	REAÇÃO NUCLEAR PREDOMINANTE	TIPO E ENERGIA DA RADIAÇÃO IONIZANTE
${}^6_3\text{Li}$	${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$	$(n, \alpha)$	$\alpha(2,05\text{MeV})$ $T(2,74\text{MeV})$
${}^{10}_5\text{B}$	${}^{10}\text{B}_4\text{C}$	$(n, \alpha)$	$\alpha(1,47\text{MeV})$ $Li(0,84\text{MeV})$
${}^{Nat}_{64}\text{Gd}$	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$	$(n, \gamma)$	<i>Elétron de conversão</i> <i>(70 keV) principal</i>

As telas cintiladoras  ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$  são excitadas pela radiação ionizante gerada na reação, emitindo fótons de luz (aproximadamente  $1,7 \times 10^5$  fótons por nêutron detectado) [24]. Na tela de dioxissulfeto de gadolínio ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ), esta radiação é um elétron de conversão com energia mais provável de  $70 \text{ keV}$ . A Figura II.5 mostra um esquema da cadeia de eventos em uma tela cintiladora.



- O cintilador tem armadilhas preenchidas nas proximidades do topo da banda proibida; os elétrons de conversão interagem na banda de valência do fósforo e perdem grande parte de sua energia ionizando o átomo absorvedor, principalmente, nas camadas *K* e *L*.
- Os elétrons ejetados se movem pela rede cristalina, perdendo energia por colisões inelásticas com os elétrons de valência, promovendo-os à banda de condução e deixando lacunas na banda de valência.
- Os elétrons que estão nas armadilhas (banda proibida) migram para as lacunas na banda de valência, emitindo fótons de luz em tempos típicos de  $10^{-8}$  a  $10^{-9}$  segundos.
- Os elétrons da banda de condução, então, migram para as lacunas na banda proibida.

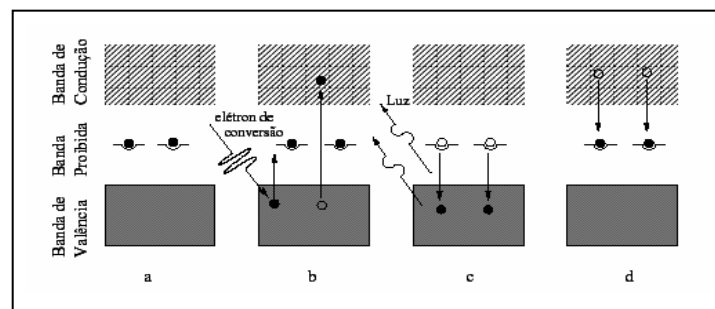


Figura II.5- Cadeia de eventos em uma tela cintiladora fluorescente [30]

A seção transversal de uma típica tela cintiladora é apresentada na Figura II.6. A camada de suporte, ou base, é feita de plástico ou outro material que garanta a rigidez necessária para evitar uma deformação, que pode fazer com que o fósforo se esfarele. Entre o fósforo e a base há uma fina camada auxiliar; dependendo da aplicação da tela cintiladora, essa camada pode conter pigmentação branca de reflexão difusa, para aumentar a saída de luz, ou pode conter um absorvedor, para reduzir o espalhamento de luz, e, assim, aumentar a resolução espacial do sistema. As partículas de fósforo possuem tamanho médio de  $10 \mu m$  e são solidificadas em um agente de coesão, cuja espessura varia de  $70$  a  $280 \mu m$ . O agente de coesão deve ser transparente para minimizar a atenuação de luz [30]. No topo da tela há uma camada protetora de cobertura, tendo uma espessura em torno de  $15 \mu m$  de forma a prover a proteção adequada e manter o espalhamento da luz gerada tão pequeno quanto possível.

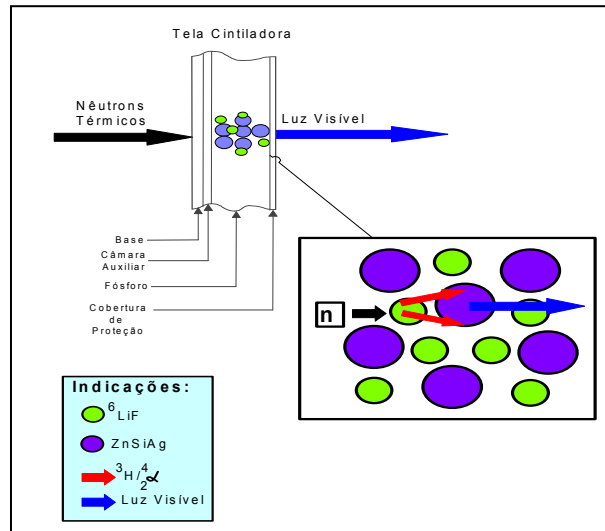


Figura II.6- Estrutura típica de uma tela cintiladora e esquema de conversão nêutron-luz.

A substância conversora usada em muitas telas consiste na mistura de óxido cerâmico ou um óxido sulfeto, como, por exemplo, o óxido sulfeto de gadolínio dopado com terras raras, como o térbio, produzindo dessa forma a luminescência. Outros conversores luminosos são feitos com uma mistura de sulfeto de zinco ou sulfeto de cádmio metálico ativado. Esses materiais luminescentes foram utilizados por muitos anos em tubos de raios catódicos, lâmpadas fluorescentes etc.

Os cintiladores que usam terras raras, tais como,  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  e  $\text{GdOBr}$ , embora apresentem uma alta resolução espacial intrínseca, aproximadamente  $100 \mu\text{m}$ , o tempo de decaimento para que a cintilação ocorra de  $400 \mu\text{s}$ , não sendo indicados para neutrografia em tempo real. Já as telas cintiladoras de  $\text{ZnS}$  apresentam características de decaimento para cintilação consistindo de duas componentes: uma rápida (40 a  $100 \text{ ns}$ ) e outra lenta (40 a  $100 \mu\text{s}$ ). A vantagem das telas cintiladoras baseadas na fórmula  ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$  sobre a  ${}^{10}\text{B}/\text{ZnS}$  é a de alta produção de luz. Outro aspecto importante para esse tipo de tela cintiladora é o fato da ativação com prata produzir maior intensidade de luz do que a ativação com cobre [27].

Os trabalhos mais recentes relatam o desenvolvimento e a comercialização de novas telas cintiladoras, como por exemplo, a adição de materiais óptico foto-

estimulador à luminescência,  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}+\text{Gd}_2\text{O}_3$ , que dentre outras vantagens, melhoram as características de dependência e sensibilidade com a temperatura e os efeitos de fadiga [33]; telas com depósito de fósforo baseados nos efeitos foto-estimuladores luminescentes,  $\text{BaFBr}:\text{Eu}_2^+$  (PSL), que podem também ser utilizados em neutrografia pelo método indireto [34], e ainda as de  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  dopado com európio, que emitem luz com componentes de comprimento de onda nas regiões do vermelho, azul e verde, que permitem, através do processamento das imagens, visualizar materiais de diferentes seções de choque para nêutrons (alta, média e baixa) [35].

- *Espelho Plano*

É montado a  $45^\circ$  em relação ao plano da imagem, tendo a função de refletir os fótons de luz emitidos pela tela cintiladora em direção à câmera de vídeo. A exigência para esse componente é que forneça uma alta reflexibilidade (95%) para a luz emitida pelo cintilador.

- *Câmera de Vídeo*

Nos últimos anos, o maior avanço em imageamento com nêutrons foi, evidentemente, o desenvolvimento de técnicas de inspeção em tempo real; porém, o que possibilitou a aplicação dessa técnica foi a evolução do detector eletrônico, conhecido como “*Charge Coupled Device*” (CCD). Esses detectores são formados por pixels, cada um da ordem de 10 a 20  $\mu\text{m}$  e são constituídos de uma camada de silicone, onde são montadas várias seqüências de transistores MOSFET. Nesses transistores, grandes quantidades de pares de elétrons-lacunas são gerados, quando um fóton incidente é absorvido no corpo de silicone. As cargas formadas são impulsionadas para serem coletadas nos eletrodos por um campo elétrico externo, gerando um sinal na saída que é proporcional à intensidade da luz absorvida. Como a dimensão de cada pixel é muito pequena, uma simples matriz pode conter algumas centenas de milhares de MOSFET; normalmente, são construídas com (512 x 512) ou (1024 x 1024) pixels, em uma área de aproximadamente 1  $\text{cm}^2$ . Como um grande número de pixels não pode ser lido simultaneamente, esses sinais são lidos um por um, seqüencialmente, sendo, ao final, removida a carga do sinal. A leitura de saída de uma imagem requer uma pequena fração de segundo. Embora curto, o tempo não é completamente satisfatório, particularmente, se os últimos pixels a serem lidos permanecerem ativos durante uma varredura completa, o que poderá reduzir a qualidade da imagem. Para evitar essa

desvantagem, na maioria dos sensores, adota-se um procedimento, tal que a metade do sensor é usada para um rápido armazenamento e a outra metade fica sendo a parte ativa. Quando a exposição é finalizada, a imagem é congelada e rapidamente transferida para um “buffer”, onde é sequencialmente lido, como explicado anteriormente.

No que se refere ao funcionamento físico, que envolve a produção do par elétron-lacuna, a temperatura é um parâmetro de desvantagem para o desempenho do CCD, cujo comportamento é expresso por uma relação exponencial entre a temperatura do cristal e a probabilidade de geração térmica de pares. O método alternativo de geração induzida produz um sinal (ruído) que é sobreposto ao sinal gerado pela luz, usualmente referido como uma razão térmica. Duas estratégias podem ser utilizadas para se reduzir o impacto do ruído na imagem final: se a imagem é bastante brilhante, reduz-se o tempo de aquisição (tipicamente 1/30 ou 1/60 do segundo); ou resfria-se o sensor a valores bem baixos de temperatura. Geralmente, o procedimento indicado, principalmente em estudos científicos, consiste em se adotar a segunda estratégia, devido à baixa intensidade de luz das imagens a serem obtidas.

O maior cuidado ao se escolher um determinado equipamento com sensor CCD, que será acoplado com uma tela cintiladora, reside no casamento entre o espectro de luz emitido pelo cintilador e a eficiência quântica (QE) do sensor. Uma técnica recente vem sendo desenvolvida para superar esse problema e consiste na adoção de uma película anti-reflexiva, que permitirá a um sensor CCD obter uma alta QE, de 0,8 a 0,9, para comprimentos de ondas de 350 *nm* até 800 *nm* [24].

A câmera deve ser montada perpendicularmente ao feixe de nêutrons emergentes do canal de irradiação, ficando o mais afastado possível, evitando assim ser atingida por nêutrons e raios  $\gamma$  que podem causar danos ao equipamento eletrônico e/ ou à qualidade da imagem a ser obtida.

- *Placa digitalizadora*

Neste dispositivo, o sinal analógico proveniente da câmera de vídeo é digitalizado, ou seja, quantizado espacialmente e em intensidade.

O primeiro passo é selecionar, a partir do sinal de vídeo, os elementos de imagem a serem digitalizados. Isso envolve a separação do que é informação de vídeo, além da

sincronização, quando o sinal é composto, isto é, informação temporal e de vídeo no mesmo sinal. Essa seleção é feita por um conversor ADC (Conversor Analógico / Digital). A quantização espacial transforma a imagem em uma matriz com dimensões que normalmente são potências de dois, por exemplo,  $2^9 = 512$  linhas por  $2^9 = 512$  colunas, totalizando 262.144 pixels, cuja resolução espacial é dada pela divisão entre as dimensões da imagem focalizada e da matriz. A imagem também é quantizada em intensidade e, nesse processo, cada nível analógico selecionado pela placa é convertido ao valor inteiro mais próximo de uma escala, que normalmente varia entre 0 e 255, fornecendo 256 níveis de cinza, que varia do preto (nível = 0) até o branco (nível = 255).

- *Processamento digital de imagens.*

Uma grande vantagem da digitalização da imagem é a possibilidade de tratá-la, utilizando métodos computacionais e melhorando significativamente a qualidade dos ensaios radiográficos. Normalmente, são considerados três tipos de processamentos digitais [47]:

- ✓ Nível Baixo: Compreende a aquisição e o pré-processamento de imagens, são utilizados para realçar ou modificar uma imagem, visando melhorar a aparência ou destacar algum aspecto da informação nela contida. Os mais usados são para ajuste de contraste, redução de ruído e tratamento pontual ;
- ✓ Nível Médio: Compreendem as tarefas de extração e caracterização de componentes, são utilizados para analisar uma imagem ou determinada região de interesse. A mais usada é a segmentação, com os objetivos de categorizar, classificar, coincidir ou medir elementos dentro da imagem;
- ✓ Nível Alto: Envolve o reconhecimento e a interpretação de dados contidos nas imagens reconstruídas, são utilizados para combinar ou reorganizar porções da imagem. As mais usadas são para reconhecimento de conjuntos de objetos e realizar funções normalmente associadas à visão.

Um dos métodos computacionais se refere à filtração espacial. Os filtros espaciais são muito utilizados e dentre eles, citam-se os filtros passa - baixa, que servem para reduzir o ruído de alta frequência e realçar as bordas; os filtros passa - alta, indicados para realçar o contraste; e o filtro mediana, que serve para eliminar ruídos aleatórios, tais como os pontos brancos que normalmente aparecem nas imagens neutrongráficas, causados pela interação de raios  $\gamma$  e pelo ruído eletrônico [32].

Um outro método baseia-se na filtração temporal, tal que a redução do ruído em imagens dinâmicas pode ser obtida, realizando-se uma média das imagens seqüenciadas. A razão sinal-ruído, obtida pela média de um certo número de imagens  $N$ , será melhorada por um fator correspondente a  $\sqrt{N}$ . Quando uma seqüência de imagens é adicionada a um outro sinal, a imagem permanece constante; contudo, os ruídos não se correlacionam e tendem a se cancelar.

Em algumas situações, a imagem obtida de um sistema de tempo real apresenta luminosidade muito baixa, resultando em uma imagem digital de baixo contraste, com muito ruído e de baixa nitidez. A integração é feita, acumulando-se certo número de imagens de baixa intensidade, criando-se assim, uma nova imagem com melhor razão sinal/ruído.

A técnica denominada janelamento, também conhecida como realce do contraste, ou mapeamento dos níveis de cinza, se refere à manipulação das escalas em cinza para melhorar a imagem. O objetivo é manipular-se a faixa total dos níveis de brilho do monitor (dos níveis mais claros de cinza até os níveis mais escuros) de modo a corresponderem somente à faixa de valores do parâmetro retratado.

- *Caixa estanque à prova de luz*

Tem duas funções: a de acomodar e posicionar os componentes descritos anteriormente e a de não permitir a entrada de luz do ambiente externo, evitando assim ofuscar a imagem formada na tela cintiladora. É construída em alumínio, por ser um material transparente aos nêutrons térmicos, conforme foi apresentado na Figura II.2, e deve ser pintada internamente na cor preto-fosco, para evitar a reflexão dos fótons de luz em direção à câmera, o que provocaria a degradação da imagem adquirida. Deve ser observado também o espaço disponível para sua instalação.

- *Princípio de Funcionamento do SEI*

Sequencialmente, a tela cintiladora é composta por um material conversor misturado a um fósforo, que transforma o feixe de nêutrons, modulado ao interagir com a amostra, em fótons de luz. Essa luz emitida pela tela é refletida em direção à câmera por um espelho

plano montado a  $45^{\circ}$ , sendo capturada por uma câmera de vídeo (CCD). A imagem analógica proveniente da câmera de vídeo segue então para uma placa digitalizadora, instalada em um computador, onde é quantizada espacialmente e em intensidade, ou seja, digitalizada. A utilização de computadores permite o emprego de técnicas para processamento de imagens digitais, para se melhorar a qualidade delas, mediante o realce das informações nelas contidas, degradadas por diversos fatores, tais como: a distribuição aleatória de fótons de luz, granulidade da tela cintiladora, textura da amostra em estudo, ruído eletrônico etc.

- *Sistemas de imageamento em tempo real*

Sendo a neutrongrafia em tempo real uma técnica que permite a observação de eventos dinâmicos no ato da irradiação, normalmente é utilizada para a visualização de: escoamento de líquidos em tubos metálicos, escoamento de óleos lubrificantes em motores, difusão/absorção de líquidos em vários tipos de materiais, engrenagens, motores, rotores etc.

O SEI em tempo real fornece imagens do evento no mesmo padrão utilizado nos sistemas de TV convencionais, isto é, quadro a quadro, 30 quadros por segundo, com resolução (512 x 512) ou (1024 x 1024) pixels. A imagem analógica capturada pela câmera de vídeo pode ser visualizada simultaneamente em um monitor de TV ou gravada em um vídeo cassete para posterior análise.

- *Caracterização dos SEI*

Historicamente, diversos indicadores têm sido usados para avaliar a capacidade de imageamento de sistemas radiográficos, sendo que o mais comum é um penetrâmetro tipo A [27]. Alguns parâmetros servem para avaliar individualmente cada um dos componentes dos SEI, tais como:

- Tela cintiladora:
  - ✓ Eficiência
  - ✓ Linearidade
  - ✓ Resolução espacial
  - ✓ Homogeneidade
  - ✓ Tempo de decaimento
  - ✓ Intensidade de luz emitida

- Câmera de vídeo:
  - ✓ Alcance dinâmico
  - ✓ Resolução espacial
  - ✓ Eficiência quântica
- Sistema de digitalização:
  - ✓ Velocidade de processamento
  - ✓ Capacidade de armazenamento
  - ✓ Conversão A/D (8, 16 bits)

Um SEI completo pode ser caracterizado de forma mais adequada através da determinação de dois parâmetros: sensibilidade e resolução. Normalmente, esses parâmetros são complementados pela determinação da Função de Transferência de Modulação (MTF).

- *Sensibilidade*

A sensibilidade de um SEI com nêutrons é definida pela sua capacidade de distinguir variações de espessuras ( $x$ ) de um material, nesse sentido o desempenho do sistema de imageamento esta relacionado com: à seção de choque total macroscópica ( $\Sigma_t$ ) do material inspecionado, e à exposição ( $E$ ), definida como o produto do fluxo de nêutrons,  $\phi_t$ , pelo tempo de irradiação  $t$  [30].

Como a transmissão de nêutrons pela matéria obedece à lei exponencial, dada pela equação:

$$I = I_0 e^{-\Sigma_t \cdot x} \quad \text{II.8}$$

E como  $E = \phi t$  é proporcional à intensidade da luz gerada no cintilador, o brilho,  $B$ , sendo normalmente uma função linear dela, pode ser representado, analogamente, por:

$$B = B_0 e^{-\Sigma_t \cdot x} \quad \text{II.9}$$

A menor variação de brilho que o sistema pode distinguir é determinada pelo valor absoluto da derivada  $dB/dx$ , ou seja:

$$\frac{dB}{dx} = \Sigma_t B \quad \text{II.10}$$

e, portanto,

$$\Delta B = B \Sigma_t \Delta x \quad \text{II.11}$$



Ao se relacionar os níveis de cinza da imagem digitalizada,  $NC$ , com os níveis de brilho da imagem analógica, obtém-se o fator  $\gamma$ , dado pela equação:

$$\gamma = \frac{\Delta NC / NC}{\Delta B / B} \quad \text{II.12}$$

a sensibilidade do SEI será dada por:

$$\Delta x = \frac{\Delta NC}{\gamma NC \Sigma_T} \quad \text{II.13}$$

onde  $\Delta NC$  é a variação mínima de níveis de cinza discerníveis.

Na prática, a sensibilidade do sistema de imageamento é obtida através da imagem de uma cunha com degraus, conhecida como escalonado, confeccionado com o material sob inspeção. Após o processamento, para a redução do ruído da imagem, são obtidos os valores de níveis de cinza correspondentes a cada degrau da cunha, em função das espessuras de degrau; utilizando-se a equação II.13 obtém-se a espessura mínima discernível pelo sistema.

- *Resolução*

A resolução de um SEI é definida como a menor distância que separa dois objetos, de um modo tal que possam ser distinguidos. A resolução espacial depende de determinadas características do sistema de imageamento.

A tela cintiladora introduz uma falta de nitidez na imagem, denominada resolução intrínseca  $U_I$ , cuja magnitude depende de sua espessura, do tipo de radiação gerada pelo material conversor e de seu alcance na tela. Da mesma forma, a divergência angular do feixe de nêutrons introduz a denominada resolução geométrica  $U_G$ . O efeito resultante dessas contribuições é dado pela resolução total do sistema,  $U_T$  [30], onde:

$$(U_T)^n = (U_I)^n + (U_G)^n \quad \text{II.14}$$

sendo  $1 < n < 3$ .

A avaliação da resolução total do sistema se dá pelo ajuste de uma função à distribuição de níveis de cinza na região de interface entre a imagem de um material altamente absorvedor de nêutrons e a do feixe direto. A função borda difusa, do inglês

“Edge Spread Function” ESF, fornece geralmente uma boa aproximação, sendo expressa por:

$$ESF = A + B \arctan(Cx + D) \quad \text{II.15}$$

onde:

$A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são parâmetros livres no ajuste;  $x$  é a coordenada da varredura de níveis de cinza.

A resolução é dada pela largura total à meia altura (FWHM) da função ESF diferenciada, ajustada a uma distribuição de Lorentz a equação II.16, onde:

$$U_T = \frac{2}{C} \quad \text{II.16}$$

Na prática, a resolução do sistema de imageamento é determinada através das imagens de uma fina chapa de material altamente absorvedor de nêutrons, por exemplo, o gadolínio ou cádmio, que é posicionada em diferentes distâncias da tela cintiladora. Na posição de distância zero, a resolução geométrica é desprezível, de modo que a resolução total  $U_T$  torna-se igual à resolução intrínseca  $U_I$ . Após o processamento da imagem, obtém-se a distribuição dos níveis de cinza ao longo da região de borda entre a chapa absorvedora e o feixe direto. A distribuição resultante deve ser ajustada, pelo método dos mínimos quadrados, à função ESF, dada pela equação II.15.

### **II.3.2 – Tomografia Computadorizada**

Quando se obtém uma imagem plana de um objeto, como em uma neutrongrafia com filme, a disposição tri-dimencional (3D) do objeto inspecionado é representada por uma imagem projetada bi-dimencional (2D). A densidade ótica em cada ponto da imagem representa as propriedades de atenuação dos nêutrons ao longo de uma linha entre o foco do feixe de nêutrons e o detector. Conseqüentemente, a neutrongrafia nos fornece somente informações a respeito de uma dimensão paralela, conforme mostra a Figura II.10. Essa limitação impede a visualização de sua estrutura e forma. Uma alternativa é a obtenção de duas neutrongrafias do objeto, obtidas em ângulos diferentes, de forma a permitir obter-se informações, tais como, volume e localização.

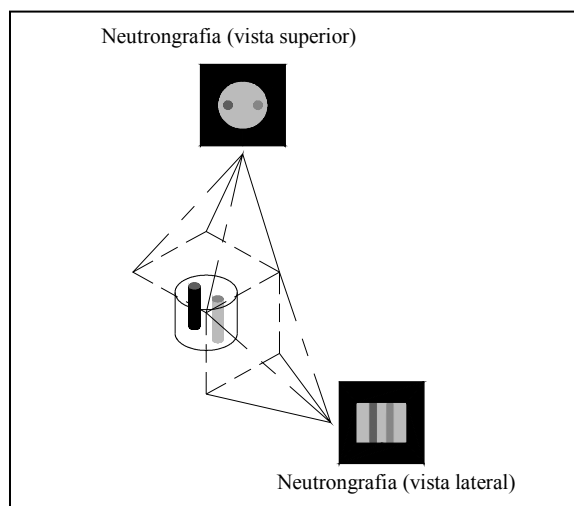


Figura II.10 – Neutrografias de um mesmo objeto, obtidas em ângulos diferentes

Para uma configuração mais complexa, por exemplo, sobre-posição de materiais, duas projeções não são suficientes, tornando necessário aumentar-se o número de projeções, conforme ilustração apresentada na figura II.11. Em alguns casos, torna-se necessária uma série de até 360 projeções com incrementos angulares de  $1^{\circ}$  ao redor do objeto. Entretanto, uma análise simultânea de 360 imagens torna-se inviável sua reconstrução por processo manual; porém, se essas imagens são arquivadas em um computador, pode-se, através de programas específicos, reconstruir as imagens da seção transversal do objeto. A Tomografia Computadorizada (TC) é um método de END baseado na inspeção radiográfica que fornece as distribuições bi e tri-dimensionais do interior de objetos.

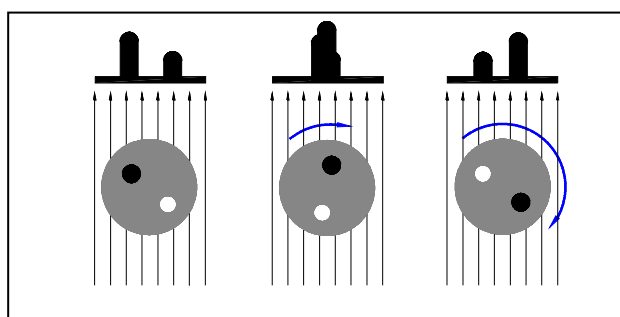


Figura II.11- Três projeções de um corpo de prova, obtidas em diferentes ângulos

Fundamentalmente, na técnica tomográfica as transmissões da radiação pelo objeto são medidas em camadas (seções transversais planas) [17]. A imagem

tomográfica é uma figura que reproduz a distribuição ou configuração da composição interna do objeto, conforme apresentado na Figura II.12.

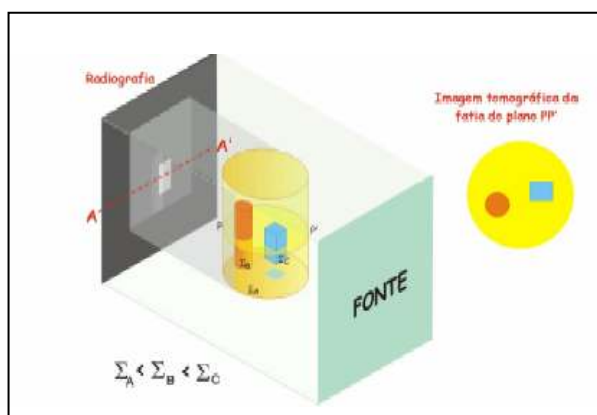


Figura II.12 - Princípio da Tomografia computadorizada [64]

A imagem 2D é formada por um arranjo de *pixels* “*picture element*” que é um elemento básico de uma imagem digital. Em TC, as imagens digitais reconstruídas normalmente possuem arranjos de 512 x 512 pixels, cada pixel representa 256 possibilidades de nível de cinza (8 bits). Cada pixel corresponde a um *voxel* “*volume element*” do objeto. Em TC (2D), um voxel tem dimensões iguais as do pixel, e em TC (3D) representa a espessura de escaneamento, conforme apresentado na Figura II.13.

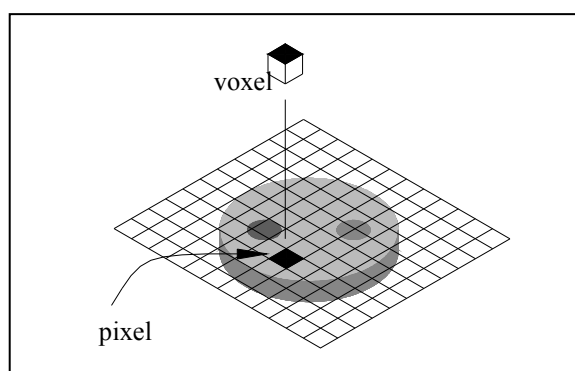


Figura II.13 – Representação de pixel e voxel contidos na imagem tomográfica 2D e 3D

### II.3.2.1 Princípios Básicos

Um feixe colimado de nêutrons monoenergéticos, ao passar por um material homogêneo, não fissionável, produz um decréscimo fracional na intensidade da radiação emergente,  $dI(x)$ , que é proporcional à distância percorrida, isto é:

$$\frac{dI(x)}{I(x)} = - N\sigma_t dx \quad \text{II.18}$$

onde  $I(x)$  é a intensidade do feixe não atenuado, ao longo do percurso do nêutron, isto é, registrado pelo detector;  $N$  é a densidade atômica do material que constitui a amostra;  $\sigma_t$  é a seção de choque microscópica total; e  $x$  é a distância percorrida pela radiação no material.

Integrando-se a equação (II.18), tem-se que:

$$I(x) = I_0(x) \exp(-\Sigma_t x) \quad \text{II.19}$$

onde  $I_0$  é a intensidade do feixe de nêutrons incidente e  $\Sigma_t$  é a seção de choque macroscópica total.

Arrumando-se a equação (II.19), obtém-se:

$$p(x) = \ln\left(\frac{I_0(x)}{I(x)}\right) = \Sigma_t x \quad \text{II.20}$$

onde  $p(x)$  é conhecido como *raio soma*, pois ele representa efetivamente a soma das seções de choque ao longo da trajetória.

Tomando-se um conjunto de transmissões paralelas, isto é, o conjunto de dados gerados pela equação II.21, obtém-se uma *projeção*, que é formada por um conjunto de raios soma. Uma projeção é a integral da imagem nesta direção, conforme representado na Figura II.14.

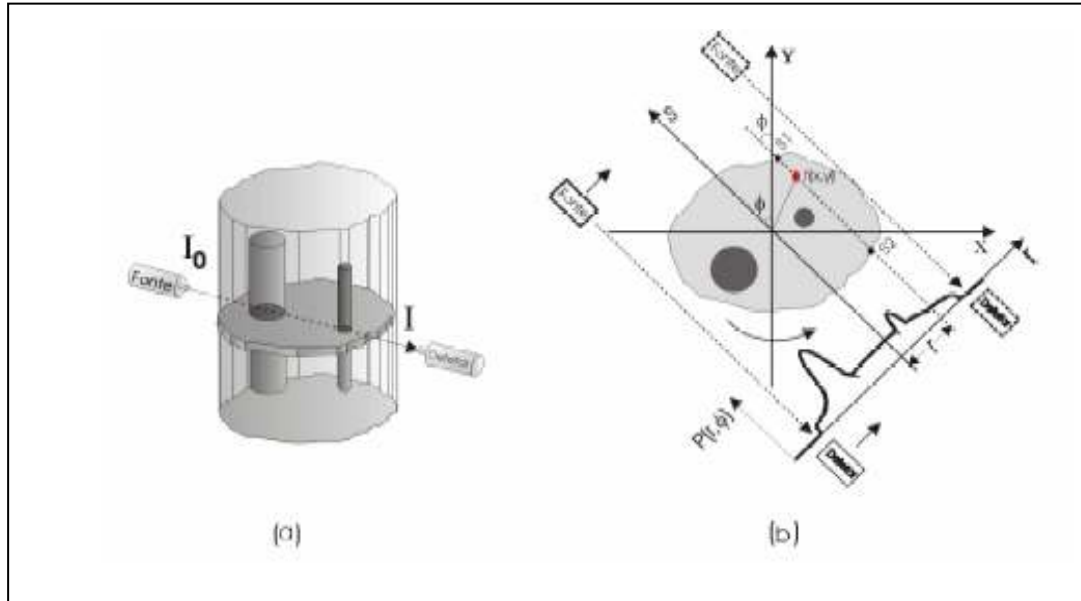


Figura II.14 – Processo de obtenção de uma tomografia bi-dimensional por transmissão. (a) destaque da seção transversal; (b) esquema de funcionamento do sistema tomográfico e o sistema de coordenadas utilizadas para descrever os raios soma [64].

Quando uma série de projeções são obtidas, a partir de incrementos angulares regulares (iguais), obtém-se um sistema de coordenadas  $(x,y)$ , que pode ser utilizado para descrever a seção transversal do objeto examinado. Cada ponto da seção transversal é denotado pela função atenuação  $g(x,y)$ , que, no caso da tomografia computadorizada por transmissão com nêutrons, é proporcional à seção de choque macroscópica total  $(\Sigma_t(E, x, y))$ , que passa a ser uma função da posição dentro do objeto examinado. Se considerarmos um feixe de nêutrons mono energético atravessando o objeto, ele será parcialmente atenuado de acordo com as propriedades específicas dos materiais que o constituem (absorção e espalhamento), dado pela equação [50]:

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\int_y g(x, y) dy\right) \quad \text{II.21}$$

ou da forma

$$p(x) = \ln\left(\frac{I_0}{I(x)}\right) = \int_y g(x, y) dy \quad \text{II.22}$$

onde  $p(x)$  é o comprimento do caminho percorrido pelos nêutrons ao longo do eixo  $-x$ , integrado sobre o eixo  $-y$ , enquanto  $g(x, y)$  representa o coeficiente de atenuação no ponto  $(x, y)$  do objeto, ou seja,  $g(x, y)$  é uma função bi-dimencional que representa uma fatia do objeto. A equação II.22 representa uma situação ideal de projeção da amostra de teste, no plano de imagem.

Na equação II.22, a incógnita  $g(x, y)$  deve ser estimada, a partir dos dados de projeção medidos. O problema da reconstrução das projeções é puramente matemático e sua solução se baseia em encontrar a função  $g'(x, y)$  que mais se ajusta aos dados de projeções experimentais. Assim, para se chegar à imagem tomográfica, que permite visualizar a estrutura interna do objeto sem destruí-lo, é necessário reconstruir-se a seção transversal do corpo de prova por meio de algoritmos matemáticos de reconstrução.

### ***II.3.2.2 – Descrição geral dos algoritmos de reconstrução***

Os algoritmos de reconstrução nada mais são do que métodos computacionais pelos quais as medidas são transformadas em imagens reconstruídas [17]. Vários métodos computacionais foram desenvolvidos para a reconstrução de imagem. É comum classificá-los em métodos algébricos (ou iterativos) e métodos analíticos (ou diretos). Os métodos de transformação ou analíticos são bastante rápidos, mas exigem um grande número de projeções para se atingir a qualidade requerida na reconstrução. Exploram uma informação exata sobre a imagem e a reconstituem, a partir de interpolações matemáticas. Seus desempenhos estão estreitamente ligados ao número de dados e à sua repartição, como, por exemplo, no caso de tomografias médicas, em que são necessárias, pelo menos, uma centena de projeções. Entretanto, quando não é possível ou não é conveniente se obter tantos dados de projeções, devido a algum tipo de limitação, os métodos analíticos não fornecem reconstruções satisfatórias. No método de retroprojeção, por exemplo, artefatos são produzidos [50]. Dentre os métodos analíticos destacam-se o de retroprojeção filtrada e o de convolução utilizado para feixes divergentes e paralelos [51].

Os métodos algébricos ou interativos, permitem maximizar (ou minimizar) o número de projeções, de acordo com um critério de escolha da melhor imagem, dentre aquelas compatíveis com os dados experimentais; por isso, são os mais utilizados nos casos onde poucos dados experimentais estão disponíveis. Como exemplo, citam-se o ART (*Algebraic Reconstruction Techniques*), que minimiza o erro médio quadrático [51]; o MART (ART com correção multiplicativa) que maximiza o funcional entropia [52] [17]. Um critério de otimização é necessário devido ao número de elementos na imagem (*pixel*) a ser reconstruída ser maior do que o número de medidas efetuadas, isto é, número de raios soma por projeção *versus* número de projeções. Quando isso ocorre, pode existir um conjunto diversificado de soluções possíveis para aqueles dados, de forma que a imagem será escolhida pelo critério que maximiza ou minimiza o funcional entropia do sistema [17]. No entanto, apesar dos métodos do tipo ART pertencerem a essa classe de otimização e expansão em séries, eles não fornecem boas reconstruções com poucas projeções, pois surgem faixas que deformam as imagens [17].

Nesse trabalho, optou-se pelo uso de um algoritmo cujo critério de estimativa baseia-se na maximização do funcional entropia, que permite se obter a melhor imagem dentre as possíveis. A escolha do funcional entropia tem argumentação bem definida na literatura [53]. Mais detalhes, bem como a formulação matemática do algoritmo de reconstrução de imagens, podem ser obtidos no trabalho de CRISPIM [17].

### ***II.3.3 – Redes Neurais Artificiais***

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos matemáticos inspirados no cérebro humano que possuem a capacidade de “aprender”, a partir de um conjunto finito de informações, e generalizar o conhecimento, o que representa a capacidade da RNA de responder adequadamente às situações não contidas no conjunto de dados utilizados como treinamento [54].

A solução de problemas através das RNA é bastante atrativa, pois sua estrutura paralelamente distribuída, aliada a sua habilidade de aprender e generalizar, cria a possibilidade de um desempenho superior, em relação à solução de problemas baseados em computação algorítmica convencional.



É caracterizada por sistemas que tentam modelar de maneira simplificada os neurônios biológicos contidos na estrutura do cérebro humano. Duas características assemelham as RNA ao cérebro humano:

1 – o conhecimento que é adquirido pela RNA ocorre através de um processo de aprendizagem;

2 – a força de conexão entre os neurônios, conhecidos como pesos sinápticos, que são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido.

- *O Neurônio Artificial*

O neurônio é uma unidade de processamento de informação que é fundamental para a operação de uma RNA. Basicamente, o modelo de neurônio artificial é composto por três elementos: um conjunto de sinapses, cada uma caracterizada por um peso ou força própria; um somador, que conforme o nome sugere tem a função de somar os sinais de entrada, após serem ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio; e uma função de ativação, que tem a função de restringir a amplitude do sinal de saída de um neurônio, tipicamente ocorrido num intervalo unitário fechado  $[0,1]$ . O modelo descrito é referido na literatura como o modelo McCulloch e Pitts [54], sendo apresentado na Figura II.15.

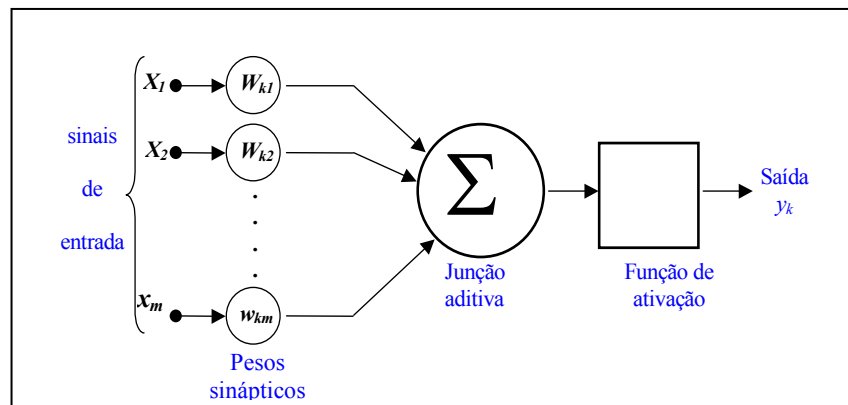


Figura II.15 – Neurônio Artificial

Um neurônio dispara quando a soma dos impulsos que ele recebe ultrapassa o seu limiar de excitação chamado de *threshold*. O corpo do neurônio, por sua vez, é emulado por um mecanismo simples que faz a soma ponderada dos valores  $x_i$  e  $w_i$  recebidos pelo neurônio, e a partir desse mecanismo, toma-se a decisão se o neurônio deve ou não disparar, comparando-se a soma obtida ao limiar ou *threshold* do neurônio. A ativação do neurônio é obtida através da aplicação de uma “função de ativação”, que ativa a saída ou não; dependendo do valor da soma ponderada das suas entradas, a função de ativação é

dada pela função limiar dada pela equação II.23 , de modo que o neurônio terá sua saída ativa quando:

$$\sum_{i=1}^n x_i w_{ki} \geq \theta \quad \text{II.23}$$

onde:

$n$  é o número de entradas do neurônio;

$w_{ki}$  é o peso associado à entrada  $x_i$  e

$\theta$  é o limiar (threshold) do neurônio.

- *Funções de ativação*

A partir do modelo proposto, foram derivados vários outros modelos que permitem a produção de uma saída qualquer, não necessariamente zero ou um, e com diferentes funções de ativação. A Figura II.16 ilustra quatro funções de ativação diferentes: linear, rampa, degrau e sigmoidal.

A função linear pode ser limitada a produzir valores constantes em uma faixa  $[-y, +y]$ ; e nesse caso, passa a ser a função rampa, mostrada na Figura II.16 (b) e definida pela equação II.25, mais adequada.

$$y = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x \geq \gamma \\ x & \text{se } x = \gamma \\ -\gamma & \text{se } x \leq -\gamma \end{cases} \quad \text{II.24}$$

Os valores máximo e mínimo da saída são  $-y$ ,  $+y$ . A função rampa é usada geralmente, como uma função linear simplificada.

A função degrau, ilustrada na Figura II.16 (c), é similar a uma função rampa, pois a função produz a saída  $+y$  para valores de  $x$  maiores que zero, caso contrário a função produz o valor de  $-y$ . A função degrau é definida na equação II.25 por.

$$y = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x > 0 \\ -\gamma & \text{se } x \leq 0 \end{cases} \quad \text{II.25}$$

A função sigmoideal, conhecida também como *S-shape*, ilustrada na Figura II.16 (d), é uma função semi-linear. É possível definir várias funções sigmoideais e uma das mais importantes é a função logística definida por:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x/T}} \quad \text{II.26}$$

onde o parâmetro  $T$  determina a suavidade de curva.

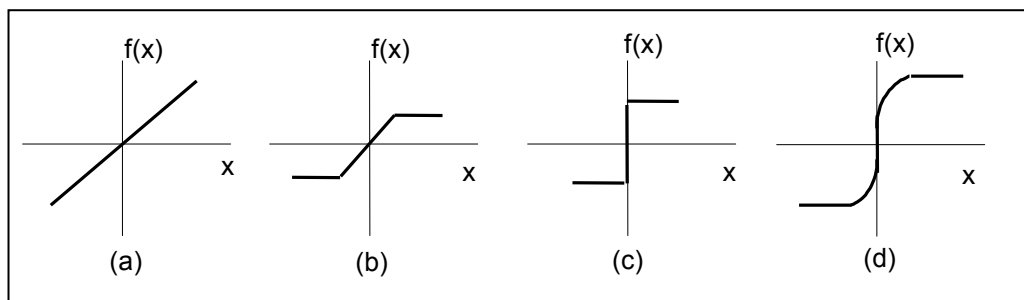


Figura II.16 – Funções de ativação

- *Arquiteturas de RNA*

As RNA são formadas por sistemas distribuídos paralelamente constituídos de unidades de processamento simples, isto é, os neurônios artificiais. Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões. Na maioria dos modelos, essas conexões estão associadas aos pesos sinápticos ( $w$ ), os quais armazenam o conhecimento experimental, ponderando a entrada recebida por cada neurônio da rede, tornando-o disponível para o uso.

A maneira pela qual os neurônios de uma rede neural estão estruturados está relacionada com o método de aprendizagem usado para treinar a rede. Foram desenvolvidos diversos métodos de aprendizagem que basicamente, diferem pela maneira como executam os ajustes dos pesos sinápticos ( $w$ ). Cada método apresenta vantagens e desvantagens inerentes à sua metodologia.

O modelo “*Multilayer Perceptron*” (MLP) [55], representado na Figura II.17, é considerado uma rede neural com o propósito geral e de utilização comum, que permite realizar o aprendizado através da correção de erros nas múltiplas camadas da rede. Dentre as mais importantes características deste modelo está a excelente capacidade de generalização e a habilidade de realizar aproximação universal de funções [55].

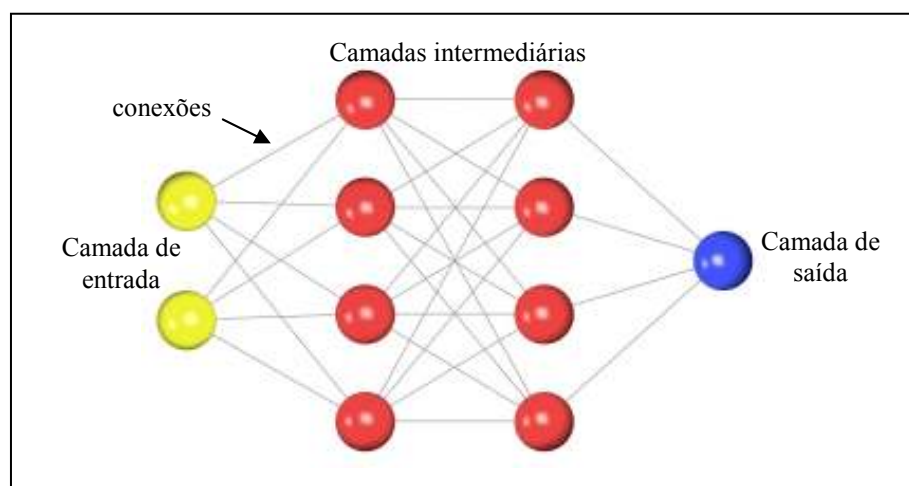


Figura II.17 - O modelo “*Multilayer Perceptron*” (MLP)

- Processos de Aprendizagem

A principal característica de uma RNA é sua habilidade de aprender, a partir de seu ambiente, e de melhorar seu desempenho, através dessa aprendizagem.

Durante o processo de aprendizagem conexionista, não se busca obter regras; o objetivo é determinar-se a intensidade das conexões entre os neurônios. O conjunto de procedimentos bem definidos utilizados para se adaptar os parâmetros de uma RNA, a fim de que a mesma possa *aprender* uma determinada função, é chamado de *algoritmo de aprendizagem*. Podem ser agrupados em dois paradigmas principais: Aprendizado Supervisionado (relações Entrada/Saída), onde são fornecidas as entradas e as respectivas saídas, e Aprendizado Não Supervisionado (Grupamentos) onde são fornecidas apenas as entradas.

No Aprendizado Supervisionado, são sucessivamente apresentadas à RNA conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante esse processo, a rede realiza um ajuste dos pesos sinápticos entre os neurônios, segundo um determinado processo de aprendizagem, até que o erro entre os padrões de saída gerados pela rede alcancem um valor mínimo desejado. Por exemplo, *perceptron*, *adaline* e *madaline*, *backpropagation* são alguns processos de aprendizagem supervisionada.

O modelo MLP treinada com o algoritmo de “*backpropagation*” [56], também conhecido como retropropagação, tem sido o modelo de rede neural artificial mais freqüentemente utilizado em problemas de classificação de padrões.

O funcionamento do algoritmo de retropropagação baseia-se na generalização do mapeamento de um padrão de entrada para um espaço de saída através da minimização do erro entre a saída que ele produziu e o padrão de saída fornecido.

O processo de treinamento inicia-se com a apresentação do padrão de entrada para o algoritmo de retropropagação. Esse padrão é propagado por toda a rede até que uma saída seja gerada. O algoritmo de retropropagação utiliza, então, sua regra de generalização para determinar o erro produzido por cada unidade da rede. Finalmente, cada unidade modifica seu peso numa direção que reduza o sinal de erro e o processo é repetido para o próximo padrão.

O treinamento deve ser interrompido, quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena, ou seja, menor que um erro admissível. Assim, deve-se encontrar um ponto ótimo de parada com erro mínimo e capacidade de generalização máxima. O critério de parada “*cross-validation*” [57] ou validação-cruzada utiliza parte do conjunto de treinamento, denominado conjunto de teste, para decidir o ponto de parada do treinamento da rede evitando, dessa forma, um super treinamento que têm, como consequência, a perda de generalização.

## **CAPÍTULO III**

### ***METODOLOGIA***

A metodologia adotada consiste em empregar END com nêutrons térmicos, buscando localizar e identificar automaticamente a presença de drogas e explosivos em bagagens de mão e postais. A estratégia utilizada se baseia na reconstrução da imagem tomográfica do objeto inspecionado, o que permite a localização do material suspeito, mesmo quando oculto. Além disso, a imagem tomográfica detém um conjunto de dados que reúnem as características dos materiais presentes nos objetos, os quais são utilizadas para a identificação automática deles, no que concerne a se tratar de substâncias ilícitas, determinando se é droga, explosivo ou um material comum.

No desenvolvimento desse sistema, foram aplicadas técnicas que apresentam respostas rápidas, tais como: a neutrongrafia em tempo real, a reconstrução de imagem tomográfica com poucas projeções e respostas automáticas através de RNA, aliadas a sistemas computacionais, o que, sem dúvida, aumenta bastante a velocidade das inspeções e a confiabilidade do sistema. Conforme já mencionado, o sistema é composto por quatro subsistemas, a saber: (1) - sistema eletrônico de aquisição de imagens neutronográficas em tempo real (SEI); (2) - sistema tomográfico de 3ª geração; (3) – sistema computacional dedicado à reconstrução da imagem tomográfica; (4) – sistema de inteligência artificial (IA) para reconhecimento automático dos materiais de interesse.

#### ***III.1 – OBTENÇÃO DA IMAGEM TOMOGRÁFICA***

A realização de uma tomografia por transmissão utilizando imagens neutronográficas em tempo real ocorre em duas etapas: 1) obtenção de um conjunto de neutronografias da amostra, que são registradas em orientações angulares diversas, relativamente ao seu centro rotacional, que coincide com o da mesa tomográfica; 2) reconstrução da imagem bidimensional da amostra, relativo ao plano específico inspecionado, executada por um algoritmo de reconstrução, utilizando como dados de projeção, aqueles gerados na etapa 1.

### III.1.1 – Ensaios Neutronográficos

Os ensaios neutronográficos foram realizados utilizando-se o arranjo experimental instalado no reator Argonauta do IEN/CNEN. As projeções neutronográficas foram tratadas por meio de técnicas de processamento digital de imagem, de forma a se extrair os dados de entrada para algoritmo de reconstrução ARIEM.

#### III.1.1.1 – Arranjo Neutronográfico

O reator Argonauta, operando a uma potência nominal de 340 watts, fornece um feixe de nêutrons no plano da imagem com as características apresentadas na Tabela III.1 [26].

Tabela III.1 – Características do feixe de nêutrons do reator Argonauta do IEN

DENSIDADE DE FLUXO DE NÊUTRONS TÉRMICOS ( $n \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$ )	RAZÃO $L/D$	RAZÃO $n/\gamma$ ( $n \cdot cm^2 \cdot mrem^{-1}$ )	ENERGIA MÉDIA (meV)
$4,46 \times 10^5$	70	$3 \times 10^6$	30

Na Figura III.1, é apresentado o espectro de energia dos nêutrons emergentes do canal J-9, do reator Argonauta [59].

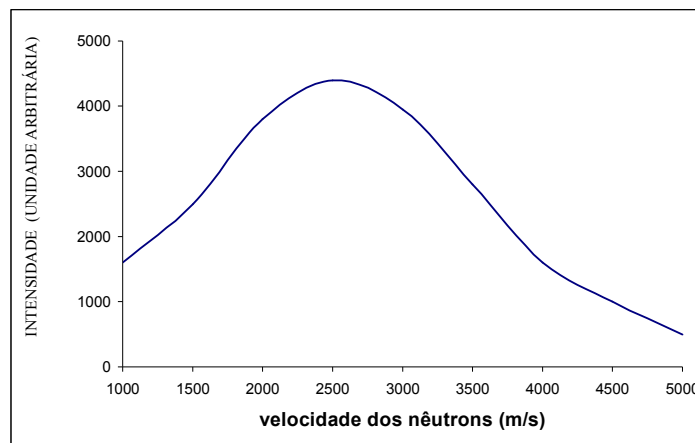


Figura III.1 – Espectro de nêutrons emergentes do canal de irradiação J-9 do reator Argonauta

O arranjo neutronográfico experimental encontra-se instalado no canal de irradiação J-9, situado na da coluna térmica externa, à meia altura dos elementos combustíveis. Na Figura III.2, é apresentada uma vista frontal da coluna térmica externa. No interior do

canal J-9, estão instalados os componentes necessários à extração do feixe de nêutrons térmicos, conforme apresentado na Figura III.3:

1. Moderador - um bloco de grafita, nuclearmente pura, com 25 *cm* de espessura, que foi determinada por cálculo da moderação dos nêutrons provindos do núcleo, na direção do canal J-9, de forma a se otimizar o percentual de nêutrons térmicos sem comprometer a intensidade do feixe neutrônico no plano de detecção da imagem [60].
2. Colimador – um colimador divergente em forma de tronco de pirâmide, tendo 60 *cm* de comprimento e divergência angular muito pequena, com área seccional quadrada, na entrada, de 16 *cm*<sup>2</sup> e, na saída, de 49 *cm*<sup>2</sup>, estando acoplado ao bloco moderador de grafita. Foi construído em grafita, com revestimento interno parcial de cádmio na borda mais externa, para permitir um bom alinhamento do feixe neutrônico. Um outro colimador paralelo moldado com parafina borada sob estrutura de alumínio, foi encaixado na saída do canal J-9, semelhante a uma gaveta, visando melhorar o alinhamento do feixe neutrônico no plano de imageamento.



Figura III.2 – Vista frontal da coluna térmica externa do reator Argonauta

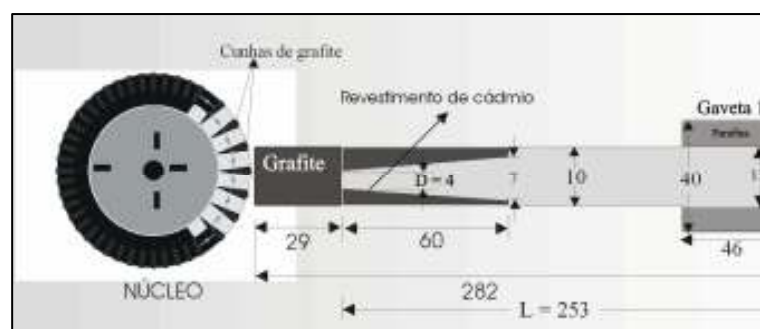


Figura III.3 – Disposição dos componentes no interior do canal J-9 (medidas em *cm*) [64]





eletrônico em tempo real. Dessa forma, é possível realizar-se neutrongrafias com os dois métodos de obtenção de imagens.

### III.1.1.2 – Sistema Eletrônico para obtenção de Imagens Neutrongráficas em Tempo real.

A partir do trabalho realizado por FERREIRA [61], foi desenvolvido um SEI, que apresenta como principal vantagem a não utilização de uma câmera (CCD) refrigerada, nem intensificador de imagem, destacando-o da maioria dos sistemas utilizados em arranjos neutrongráficos descritos na literatura, menos dispendioso, do ponto de vista econômico e operacional, podendo ser utilizado em arranjos de baixo fluxo de nêutrons. Outro aspecto importante quanto aos seus componentes é a utilização de um acoplamento óptico com lente *MACRO* que propicia uma área de inspeção de aproximadamente (150 x 150) mm. O SEI é apresentado na Figura III.5 (a) e (b), sendo formado pelos componentes descritos a seguir:

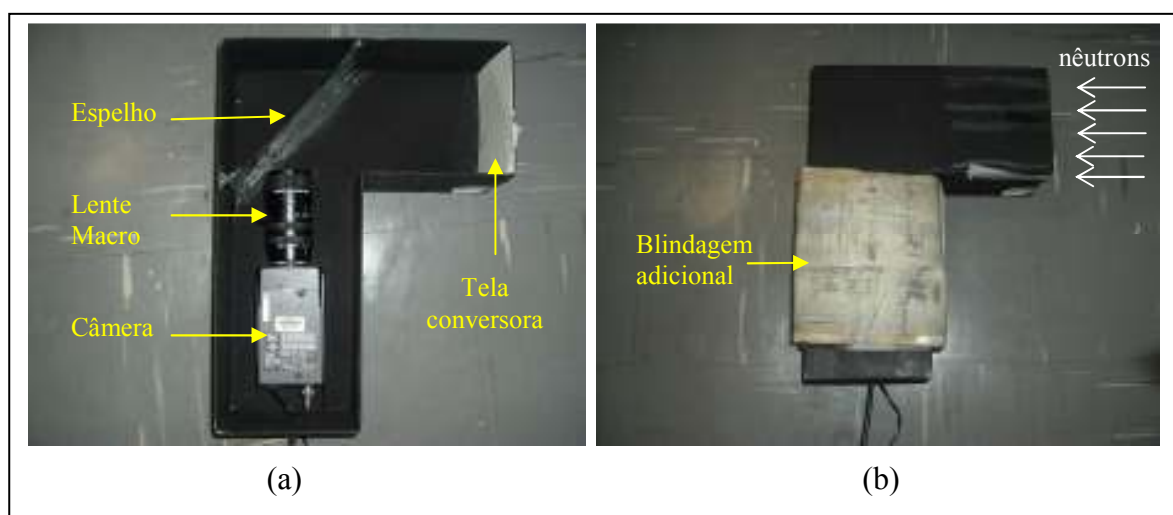


Figura III.5 – (a) Disposição interna dos componentes do SEI, (b) Vista externa do SEI, com blindagem adicional de chumbo e cádmio

- *Tela cintiladora*

A tela cintiladora para nêutrons utilizada foi a NE-425 com área de imageamento de (100 x 150) mm, cuja composição típica é de  ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$ . A reação nuclear predominante é  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ , sendo emitidos cerca de  $1,7 \times 10^5$  fótons de luz por nêutron detectado [24].

- *Espelho Plano*

Um espelho plano comum é montado com inclinação de  $45^0$ , em relação ao plano de imagem, que reflete a imagem formada na tela cintiladora na direção a câmera CCD.

- *Câmera de vídeo*

A câmera de vídeo utilizada, fabricada pela *Panasonic*, modelo WV – CL 920, possui um CCD de  $\frac{1}{2}$ " (diagonal principal) com resolução de 580 linhas. A imagem capturada pode ter até 768(H) X 494(V) pixels analógicos. O sinal de saída é do tipo vídeo composto. A câmera pode trabalhar com iluminação mínima de 0,02 *LUX*, para uma abertura de lente, *f*, de 1,4.

- *Caixa estanque à prova de luz*

Tem duas funções: acomodar e posicionar os componentes descritos anteriormente; e impedir a entrada de fótons de luz do ambiente externo, evitando sua interferência na formação da imagem na tela cintiladora. Foi construída em alumínio, por ser um material transparente aos nêutrons térmicos, conforme apresentado na figura II.2, tendo sido pintada externa e internamente na cor preto-fosco, de forma a evitar que os fótons de luz sejam refletidos na direção à câmera, o que provocaria a degradação da imagem adquirida. Ao dimensioná-la, considerou-se a área útil de imageamento, o espaço disponível para sua instalação e a acomodação dos componentes descritos.

- *Placa digitalizadora*

Para a digitalização das imagens, foi utilizada uma placa *Pinnacle* modelo *PCTV USB2*, que permitiu a captura das imagens, numa taxa de até 30 quadros por segundo, com resolução de (640 x 480) *pixels* e 8 bits, ou seja, 256 níveis de cinza, com sinal de saída do tipo vídeo composto.

- *Computador e Programas computacionais*

Os computadores, com programas computacionais específicos para aquisição e processamento digital das imagens estáticas e dinâmicas, tais como *PCTV USB2 VISION* – que controla a placa digitalizadora com opções de controle dos parâmetros da digitalização, promove a captura de imagens e de filmes, gerando arquivos do tipo *AVI*.

Na tomografia, em cada posicionamento angular do corpo de prova, é adquirida uma sequência de imagens, gerando um arquivo do tipo *AVI* com 75 imagens. Após essa

aquisição, são aplicadas técnicas de processamento digital de imagem, para melhorar a qualidade das imagens e extrair os dados necessários para alimentar o algoritmo de reconstrução ARIEM.

Atendendo à Norma CNEN – NN – 3.01, o aparato computacional, composto de placa digitalizadora e microcomputador, foi instalado em um local radiologicamente permitido.

- *Caracterização do SEI*

É de fundamental importância, para a reconstrução de tomografias que possibilitem a identificação de materiais, que as imagens obtidas através do SEI neutrongráfico sejam qualificadas, de modo a fornecer as informações adequadas relativas à atenuação do feixe de nêutrons quando atravessam a amostra.

A Norma ASTM E 1441-95 [58] propõe um método para determinação qualitativa relativa da radiografia com nêutrons térmicos pelo método direto. As Neutrongrafias podem ser avaliadas em termos do nível de qualidade da imagem obtida, seja por exame visual, feito normalmente com o auxílio de um Indicador de Resolução (IR), seja por Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI), que incluem um Indicador de Pureza de Feixe (IPF) e Indicador de Sensibilidade (IS) [63]. O julgamento da qualidade neutrongráfica pode se basear na análise das imagens desses indicadores [43].

Segundo a Norma ASTM E 545-91 [63] o IPF foi projetado para fornecer informações referentes ao feixe de nêutrons e parâmetros do sistema de detecção de imagem que contribuíssem para a exposição do registrador e, desse modo, afetavam a qualidade global da imagem.

O IPF utilizado foi construído segundo as recomendações da Norma ASTM E 545-91. Confeccionado em um bloco de teflon de seção quadrada de  $645,16 \text{ mm}^2$  por  $8 \text{ mm}$  de espessura e furo centralizado de  $15,9 \text{ mm}$  de diâmetro, contendo dois discos de chumbo (Pb) 99,999 % puro, dois discos cerâmicos de nitreto de boro (BN), todos os quatro discos com  $2 \text{ mm}$  de diâmetro e duas barras de cádmio (Cd), 99,999 % puro, com  $0,64 \text{ mm}$  de diâmetro e  $12 \text{ mm}$  de comprimento, dispostos conforme apresentado na Figura III.6.

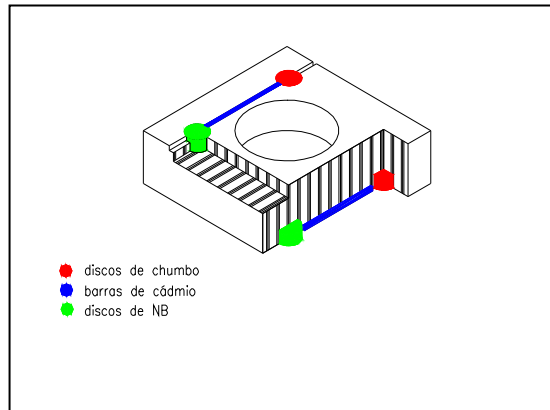


Figura III.6 – Indicador de Pureza de Feixe (IPF)

De acordo com a norma ASTM-E 545-91[63], os conteúdos percentuais dos parâmetros que influenciam na qualidade do feixe neutrônico podem ser estimados com base nas medidas densitométricas da imagem do IPF. Elas permitem determinar, quantitativamente, o contraste radiográfico, a contribuição de raios  $\gamma$  inerentes ao processo de produção de pares ( $e$ , subsequentemente, a produção de fótons  $\gamma$  de 511 keV), a nitidez da imagem e a informação sobre o filme e a qualidade de revelação. Por recomendação da Norma, o IPF deve ser posicionado paralelamente e tão próximo quanto possível do SEI.

O IRV utilizado foi construído segundo os critérios estabelecidos pela Norma ASTM E 1025-84 [62], para a qualificação da imagem radiográfica, confeccionado em chapa de cádmio com 0,5 mm de espessura, com orifícios de 0,25 e 1,00 mm de diâmetro, espaçados com distâncias iguais aos diâmetros, conforme mostra a Figura III.7.

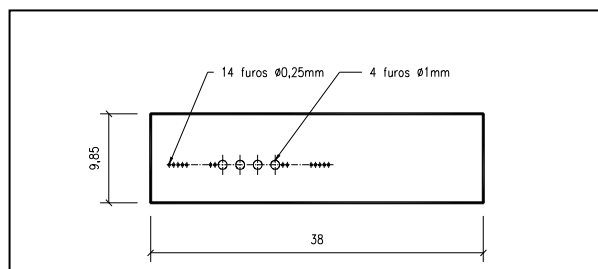


Figura III.7 – Indicador de Resolução Visual (medidas em mm)

O IS utilizado foi construído segundo os critérios estabelecidos pela Norma ASTM E 1025-84 [62], para a qualificação da imagem radiográfica, construído em forma de cunha com degraus e confeccionado em *lucite* ( $C_5O_2H_8$ ), utilizado como referência, por ser um material rico em hidrogênio, cuja seção de choque de espalhamento é alta para nêutrons de baixa energia, conforme mostra a Figura II.2. Semelhante ao que ocorre com as amostras ilícitas analisadas neste trabalho. A Figura III.8 mostra o desenho esquemático do IS.

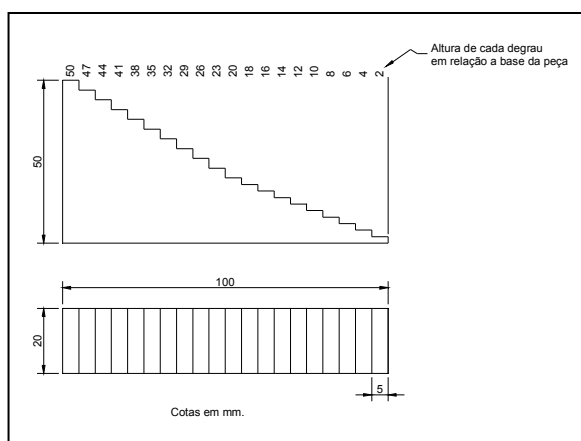


Figura III.8 – Indicador de Sensibilidade

### III.1.1.3 - Processamento digital das imagens

Para o processamento digital das imagens foi utilizado o programa computacional *Image-Pro Plus*, sendo suas principais funções:

- ✓ Ler e gravar as imagens em vários formatos, incluindo AVI, TIFF, JPEG, BMP e outros;
- ✓ Trabalhar com escalas de níveis de cinza com formato de 8, 12, 16, ou 32 bits;
- ✓ Trabalhar com escalas de cores com formato de 24, 36 ou 48 bits, nos formatos RGB, HSI, HSV ou YIQ;
- ✓ Tratar as imagens, mediante recursos, como realce de cores e filtros de contraste, incluindo operações de transformada de Fourier, morfologia, aumento de área, subtração de máscara, entre outras operações espaciais e geométricas, além de possibilitar a aplicação de filtros temporais;
- ✓ Identificação e contagem de objetos, manualmente ou automaticamente. Pesquisa de objetos ou atributos, tais como: área, ângulo, perímetro, diâmetro, circunferência e razão. Ajuste da escala espacial, a partir de uma unidade de medida;
- ✓ Fornecer dados numéricos, estatísticos ou em forma gráfica (histograma ou dispersão);

- ✓ Classificar dados de medidas, de acordo com critérios pré-estabelecidos (cores, níveis de cinza);
- ✓ Trabalhar com uma área de interesse (AOI), fornecendo medidas de intensidade média ou individualizadas.

Uma vez adquirida cada uma das sequências de imagens neutronográficas, há necessidade de se realizar um pré-processamento, visando melhorar a resolução espacial e a eliminação de degradações causadas por ruídos espúrios [30], isto é, pontos brancos causados pela radiação  $\gamma$ ; correção de danos causados devido a dependência entre a razão sinal/ruído e a temperatura do CCD; correção de artefatos [47]. Para o pré-processamento das imagens neutronográficas, foi utilizado o programa computacional *Image Pro-plus*, sendo aplicadas as seguintes técnicas de processamento, na seqüência:

1. Extração de imagens quadro a quadro dos arquivos (tipo AVI);
2. Aplicação de filtro temporal (média de uma sequência de 75 quadros) [30];
3. Conversão da imagem “média” obtida para 256 níveis de cinza;
4. Aplicação de filtro “mediano” 3x3 [32];
5. Aplicação de filtro “passa alta” 3x3;
6. Armazenamento da imagem final em forma BitMaP (BMP).

A reconstrução de uma imagem tomográfica requer varreduras em linha, adquiridas relativamente a uma mesma altura em todas as projeções neutronográficas, obtidas através do SEI, perpendicularmente ao eixo de rotação da mesa tomográfica. Como a imagem adquirida pelo SEI já está digitalizada e processada, seleciona-se a linha de interesse correspondente à seção transversal a ser reconstruída, esquadrihada em cada projeção. Para isso, utilizou-se referências registradas nas imagens neutronográficas do IRV. O perfeito alinhamento da seção transversal a ser reconstruída em cada uma das imagens neutronográficas é de fundamental importância, uma vez que o algoritmo de reconstrução é muito sensível à centralização dos dados.

Após a edição dos dados relativos a cada uma das projeções, a quantização espacial transforma a linha, que, neste caso, é uma porção da imagem neutronográfica, em uma matriz com dimensão de  $(1 \times 103)$  *pixel's*. Cada pixel é quantizado em intensidade e, nesse processo, cada nível analógico selecionado é convertido ao valor inteiro mais próximo da escala, que varia de 0 a 255, fornecendo 256 níveis de cinza, desde o preto (nível = 0) até

o branco (nível = 255). O processamento é realizado pelo programa computacional Image Pro-plus, conforme descrito na seqüência abaixo:

1. Alinhamento das imagens obtidas;
2. Seleção da área de interesse, seção do objeto a ser reconstruída;
3. Quantização espacial;
4. Ordenação dos dados.

Em seguida, um arquivo (ENTRADA\_TOMOGRAFIA) é gerado, contendo as informações das seis diferentes projeções neutronográficas ( $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ ,  $150^{\circ}$ ) obtidas conforme esquema mostrado na Figura II.14, com nível de discretização de 103 abscissas, que foram tratadas e colocadas na forma da equação II.22.

#### ***III.1.1.4 – Mesa Tomográfica***

O sistema tomográfico desenvolvido é de terceira geração, onde a fonte de radiação e o arranjo detector (SEI) permanecem fixos. Para a rotação do corpo de prova em incrementos angulares uniformes de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$ , foi construída a mesa tomográfica, mostrada na Figura III.9. A mesa tomográfica consiste de um disco acoplado a um motor de passo fixado na parte interna da estrutura, que fornece o movimento necessário à mesa, sendo controlado por um microcomputador (o mesmo utilizado na aquisição e processamento das imagens). Um programa computacional foi desenvolvido de modo a possibilitar ajustes de incremento angular e sentido de rotação, como mostra a tela de entrada de dados, na Figura III.10. Tanto o disco como a estrutura da mesa tomográfica foram construídos em alumínio, em razão de suas baixas seções de choque de captura e espalhamento para nêutrons. As amostras, quando submetidas a diferentes rotação em torno de seu eixo central, dão origem às respectivas projeções neutronográficas. O centro das medidas foi definido pela superposição das posições de  $0^{\circ}$  e  $180^{\circ}$ , no disco móvel onde se coloca a amostra. Neste trabalho, foram obtidas neutronografias com incrementos angulares subseqüentes de  $30^{\circ}$ .



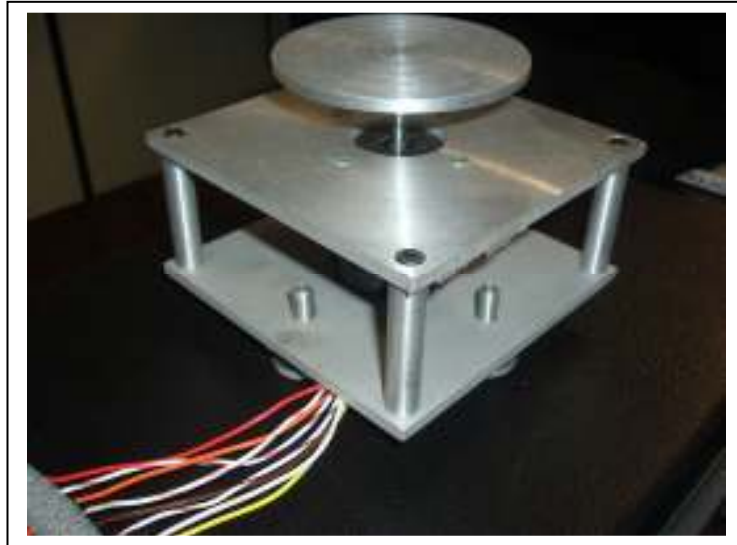


Figura III.9 – Mesa Tomográfica



Figura III.10 – Tela de entrada de dados referente ao controle da mesa tomográfica

Durante a irradiação, a mesa tomográfica, com o corpo de prova, e o SEI são instalados na posição central do canal de irradiação J-9, onde o fluxo é máximo ( $4,46 \times 10^5 n/cm^2s$ ), de um modo tal que a câmera de vídeo fique posicionada perpendicularmente ao feixe de nêutrons, como mostra a seqüência de Figuras III.11 (a), (b), (c) e (d).



Figura III.11 – (a) Canal de irradiação; (b) Mesa tomográfica; (c) Mesa tomográfica e SEI; (d) Mesa tomográfica e SEI

### ***III.1.2 – Reconstrução das Imagens Tomográficas***

Conforme descrito no item III.1, para a reconstrução das imagens tomográficas utilizando o algorítmico ARIEM, realizou-se seis diferentes projeções neutrongráficas ( $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ ,  $150^{\circ}$ ) da amostra. Na Figura III.12, observa-se a NRTR referente da amostra 1 (cocaína em pó, com 50 % de pureza), registrada pelo SEI, referente a projeção de  $0^{\circ}$ .

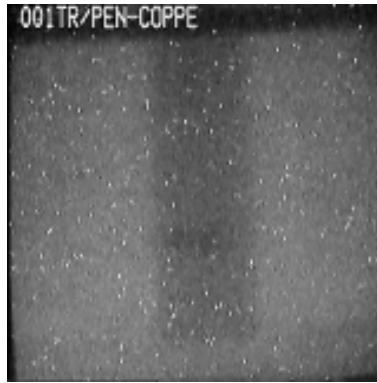


Figura III.12 – Imagem neutrongráfica em tempo real, da amostra de cocaína em pó com 50 % de pureza obtida com o SEI instalado no canal de irradiação J-9 do reator Argonauta

A Figura III.13 mostra a mesma imagem após o pré-processamento digital descrito na seção III.1.1.3, que visa melhorar a resolução espacial e eliminar as degradações causadas por ruídos espúrios.

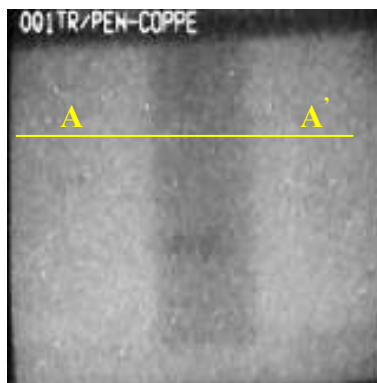


Figura III.13 – Pré-processamento digital da imagem neutrongráfica em tempo real mostrada na Figura IV.12.

Após o processamento digital, usando-se a sub-rotina *SUB ENTRADA-TOMOGRRAFIA* descrita anteriormente, é gerado um arquivo (*ENTRADA\_TOMOGRRAFIA*) contendo as informações das seis diferentes projeções neutrongráficas ( $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ ,  $150^{\circ}$ ), com nível de discretização de 103 abscissas, resultando na imagem reconstruída pelo algoritmo ARIEM. A distribuição dos níveis de cinza, correspondentes à linha de varredura neutrongráfica A-A', assinalada na Figura III.13, é mostrada na Figura III.14. Na Figura III.16, é mostrada a imagem tomográfica da amostra de cocaína em pó com 50 % de pureza, sem ocultação por outro material,

reconstruída a partir das seis projeções neutrongráficas correspondentes àquela linha de varredura selecionada.

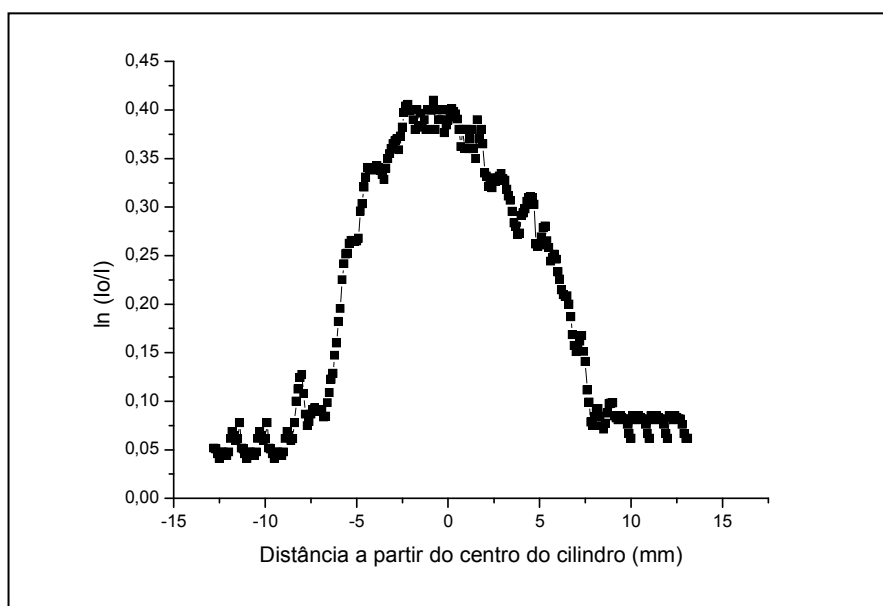


Figura III.14 – Distribuição de níveis de cinza na linha de varredura A-A', assinalada na Figura III.13, correspondente à projeção de  $0^{\circ}$  da amostra de cocaína em pó com 50 % de pureza.

### ***III.1.1.5 – Algoritmo de Reconstrução de Imagens baseado no conceito de Entropia Máxima (ARIEM)***

O Algoritmo de Reconstrução de Imagens baseado no conceito de Entropia Máxima, ARIEM, foi usado para a reconstrução das imagens tomográficas, sendo os dados de entrada fornecidos pelo arquivo (ENTRADA\_TOMOGRFIA), que continha as informações pertinentes às seis projeções neutrongráficas ( $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ ,  $150^{\circ}$ ) a ao nível de discretização contendo 103 abscissas, que foram os mesmos parâmetros utilizados por CRISPIM [17], SILVA [14] e HACIDUME [18]. Na Figura III.15, é apresentada a tela de entrada de dados do programa ARIEM.

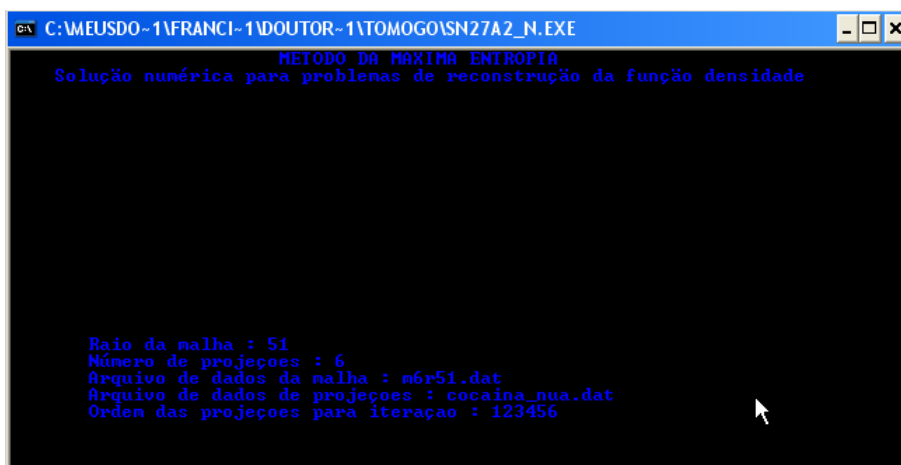


Figura III.15 - Tela de entrada de dados do programa ARIEM

Na Figura III.16, é apresentada a imagem tomográfica, da amostra de cocaína em pó com 50 % de pureza, reconstruída com o algoritmo ARIEM, a partir das seis projeções neutrongráficas.

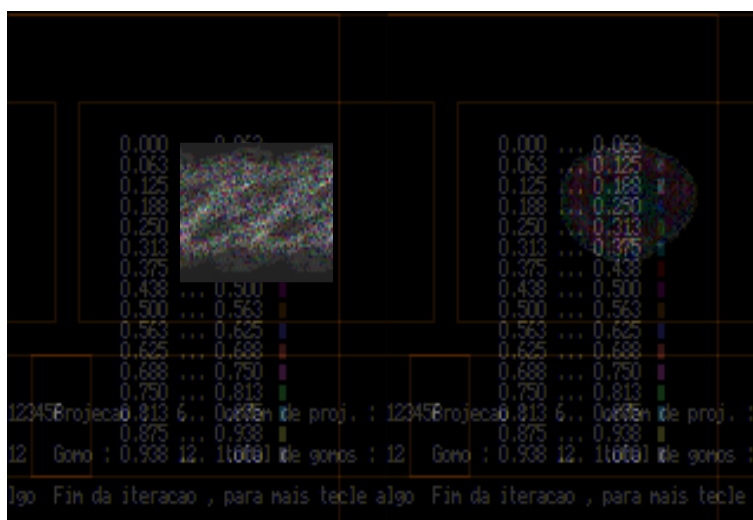


Figura III.16 – Imagem tomográfica resultante de seis projeções neutrongráficas da amostra vista na Figura III.13, reconstruída com o algoritmo ARIEM

### III.2 – Localização e identificação de drogas e explosivos

Buscando avaliar o desempenho do sistema, foram realizadas diversas NRTR de corpos de prova contendo amostras reais de drogas, explosivos e outros materiais normalmente encontrados em bagagens de mãos e postais. A realização destes ensaios, considerando-se ainda a ocultação das amostras por alguns materiais capazes de confundir

o sistema analisador de imagens, é de suma importância para a segurança pública nacional e internacional, objetivo principal desse trabalho. Nesse sentido, as amostras foram preparadas, tendo-se como meta analisar suas respectivas imagens tomográficas com nêutrons.

### ***III.2.1 – Amostras inspecionadas e condições de ocultação***

As amostras inspecionadas consistem de:

- **Narcóticos e explosivos**

amostra	descrição
. droga 1:	Cocaína em pó (50% de pureza);
. droga 2:	Cocaína em pó (90% de pureza);
. droga 3:	Cocaína em pasta;
. droga 4:	Crack (cocaína em pedra);
. explosivo 1:	Simulador de explosivo ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ );
. explosivo 2:	Segmento de explosivo, com carga de C4.

- **Outros materiais.**

amostra
. açúcar;
. baton;
. café;
. caneta esferográfica plástica;
. cigarro;
. couro;
. papel;
. sal de frutas;
. talco;
. tecido de algodão.

As amostras foram acondicionadas em porta-amostras de formato cilíndrico, confeccionado com alumínio, tendo 1 mm de espessura de parede, 35 mm de altura e 10 mm de diâmetro, possuindo tampa rosqueada, conforme ilustrado na figura III.17, exceto

o porta amostra contendo a amostra de explosivo 1 que possui diâmetro de 15 *mm* e a amostra de explosivo 2 que possui o formato apresentado na Figura III.18.



Figura III.17 – Porta amostra de alumínio

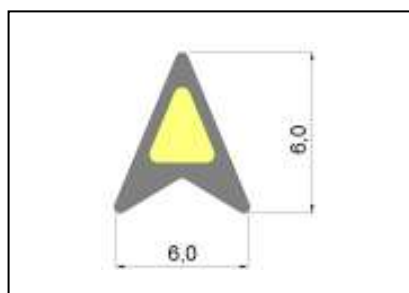


Figura III.18 – Dispositivo explosivo, com carga de C-4 (medidas em *mm*)

Estas amostras foram submetidas a diversas situações, de forma a simular o comportamento de terroristas e traficantes ao tentar ocultá-las das autoridades policiais. Dentre as situações possíveis, analisou-se as imagens tomográficas obtidas decorrentes da ocultação das amostras por chumbo, ferro, alumínio, madeira, tecido de algodão, couro, fumo e pó de café, em espessuras compatíveis. Nas Figuras III.19, III.20, III.21 e III.22 são apresentados os desenhos esquemáticos das ocultações usadas.

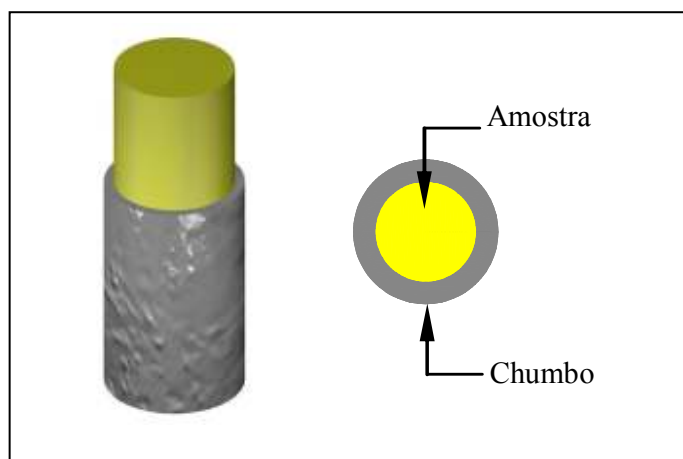


Figura III.19 - Amostra oculta por revestimento de 2 mm de espessura de chumbo

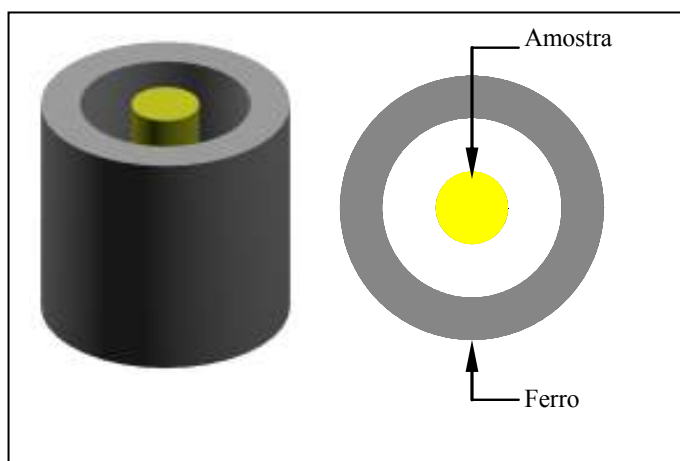


Figura III.20 - Amostra oculta por revestimento de 5 mm de espessura de ferro

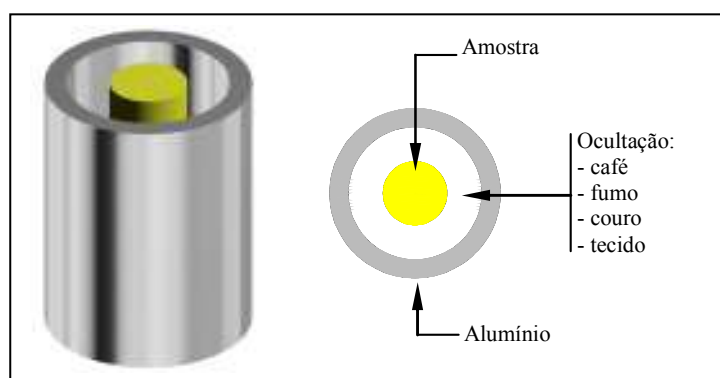


Figura III.21- Amostra oculta por revestimento de 5 mm de espessura de café, fumo, couro ou tecido



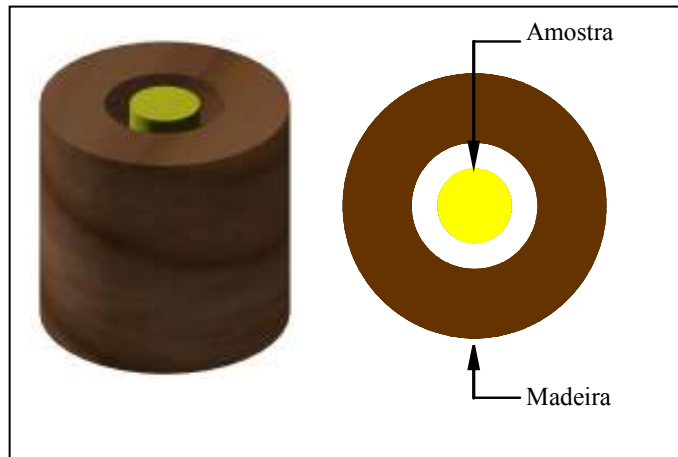


Figura III.22- Amostra oculta por revestimento de 10 mm de espessura de madeira

A ocultação por metais pesados foi utilizada para demonstrar que a Neutrongrafia, neste caso é uma técnica alternativamente vantajosa, em relação a uma inspeção por raios X. A ocultação por fumo e pó de café, simularia a tentativa de enganar os cães farejadores, processo muito utilizado pelos traficantes [2]. A presença dos materiais tecido e couro é esperada em malas de passageiros, em terminais aeroviários, rodoviário, ferroviários. A madeira é usada em pequenas embalagens postais, sendo sua composição química rica em carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, o que resultaria em um baixo contraste nas imagens neutronográficas.

Ainda buscando reproduzir situações mais próximas da realidade, realizou-se ensaio de um objeto contendo ao mesmo tempo amostras de droga, explosivo e outros materiais (açúcar e couro). Na Figura III.23, é apresentado um desenho esquemático dessa simulação.

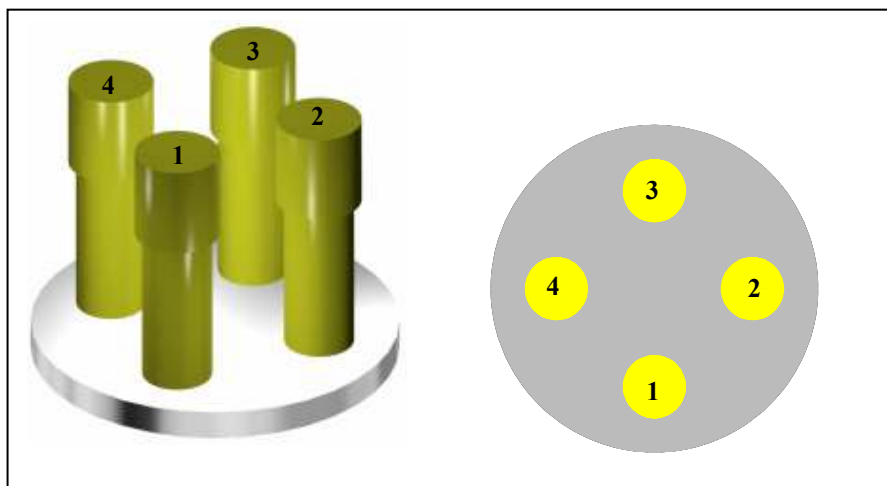


Figura III.23 - Objeto contendo (1) amostra de explosivo, (2) amostra de açúcar, (3) amostra de droga, (4) amostra de couro.

### ***III.2.2- Análise e processamento das imagens tomográficas***

A avaliação visual das imagens tomográficas é o critério mais direto e rápido. Pode-se focalizar a atenção nas imagens a serem comparadas, observando-se a reprodução ou não de detalhes ou se artefatos espúrios foram introduzidos, durante o processo de reconstrução, seguindo a metodologia adotada por CRISPIM [17], quando buscava visualizar (identificar) a presença de materiais na imagem reconstruída. Entretanto, a análise visual das imagens, sob certas circunstâncias, é imprecisa, uma vez que pessoas diferentes podem interpretá-las de forma diferente. Como o reconhecimento das amostras em foco abrange o aspecto de segurança pública, o critério qualitativo visual não é suficiente.

Neste trabalho, a análise das imagens neutronográficas deve funcionar como um processo de descobrimento, identificação e do entendimento de comportamentos referenciais que são relevantes na tarefa de identificação e localização dos materiais de interesse, isto é, drogas e explosivos. A principal meta de uma análise dessas por computador é atingir uma dada precisão de reconhecimento automático desses comportamentos. Neste caso, o sistema computacional deve ser capaz de: (1) extrair informação pertinente, a partir de um banco de dados que pode ou não ser incompleto ou desconhecido; (2) aprender, a partir de exemplos, e generalizar o conhecimento de maneira que possa ser aplicado em circunstâncias novas e diferentes.

Na primeira etapa, foram executados os procedimentos descritos no item III.1, que originaram as imagens tomográficas das seções transversais reconstruídas, relacionadas às linhas de varredura A-A' selecionadas em cada projeção neutronográfica e referentes a cada ensaio realizado. Em seguida, foram empregadas as técnicas de janelamento, isto é, segmentou-se as imagens de acordo com a frequência de níveis de cores, que se relacionam à atenuação dos nêutrons nos materiais que constituem a amostra, conforme observado na Figura III.16

A partir da imagem tomográfica reconstruída, obtém-se um histograma de níveis de cores característico, apresentado na Figura III.24, que representa a de frequência normalizada de cada cor presente na imagem. Cabe ressaltar que a versão do ARIEM utilizada possibilita a discriminação em 16 cores, conforme pode ser observado na legenda presente na Figura III.16.

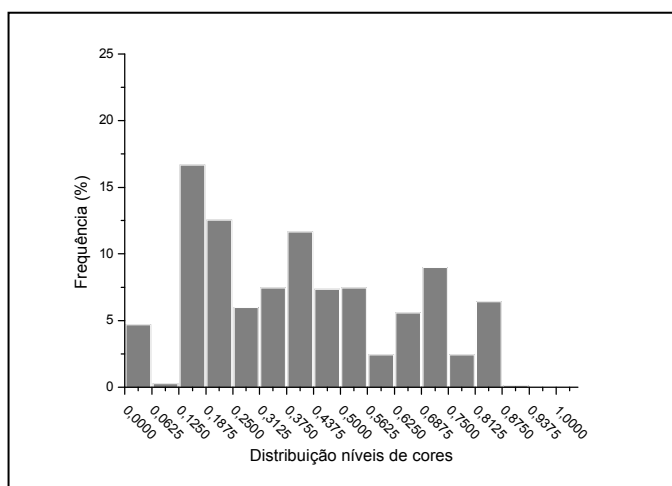


Figura III.23 - Histograma de níveis de cores da imagem tomográfica apresentada na Figura III.16

Nos casos onde é identificada a presença de mais de um material no objeto inspecionado, torna-se necessário separar cada material em uma Região de Interesse Individual (RII), conforme apresentado na Figura III.24. Se cada RII for analisada separadamente, dessa forma torna-se possível a identificação dos diversos tipos de materiais presentes e sua localização relativa dentro do objeto inspecionado.



Figura III.24. Imagem tomográfica de um objeto contendo quatro materiais, e suas respectivas RII

Um grande desafio no desenvolvimento deste sistema foi a elaboração de uma metodologia capaz de detectar (identificar e classificar) os materiais ilícitos (drogas e explosivos), de forma automática e independente da ação do operador. Para tal, optou-se pela aplicação de RNA, que além das vantagens descritas anteriormente, são ecléticas, no que se refere à adição de novos materiais e outras formas de ocultações.

### ***III.2.3- Predição da RNA para a classificação e identificação dos materiais inspecionados***

Neste trabalho, optou-se pela aplicação de redes neurais com arquiteturas de multicamadas do tipo “*Multilayer Perceptron*” (MLP), com treinamento supervisionado, baseado no algoritmo de retropropagação “*Backpropagation*” com critério de parada de correlação cruzada “*cross-validation*” baseado no melhor resultado para o conjunto de teste, descritas no item II.3.3 para a determinação e classificação de comportamentos referenciais das imagens digitais [47].

Para se descartar a necessidade de uma programação extensa e complexa, optou-se pela utilização do programa computacional *Neuro-Shell 2.0*, que é um aplicativo para

redes neurais, visto que ele permite a escolha de alguns parâmetros, tais como: diversas arquiteturas de redes neurais, tipo de treinamento e critério de interrupção a ser aplicado. Outras facilidades estão relacionadas a determinação do número de neurônios para cada camada de rede, conjunto de treinamento, teste e produção, tipo de treinamento, além da possibilidade de se acompanhar o treinamento em tempo real.

No treinamento da RNA, utilizou-se os conjuntos de dados extraídos dos histogramas de níveis de cores característicos, obtidos a partir das imagens tomográficas reconstruídas, de cada tipo de amostra. Visando a obtenção de um número adequado de conjuntos de dados para se realizar um treinamento satisfatório da RNA, foram realizados diversos ensaios, a saber: a) com cada amostra nua; b) nas condições de ocultação descritas no item III.2 para as amostras, “droga 3” e “explosivo 1”. Cada ensaio originou um histograma de níveis de cores característico, sendo que, para a condição de objeto composto por quatro amostras diferentes (droga, explosivo, açúcar e couro), foram gerados quatro histogramas característicos correspondentes às quatro RII, totalizando 154 histogramas característicos. Os 154 conjuntos de dados foram subdivididos em subconjuntos, a saber: 86 conjuntos para o treinamento; 34 conjuntos para teste e 34 conjuntos para produção. A etapa de treinamento supervisionado da RNA exige os seguintes dados:

- i) Entradas da RNA - Percentual de frequência de cada faixa de coeficiente de atenuação presente na imagem.
  
- ii) Saídas da RNA - Foram utilizadas duas opções de saída para as RNAs, a saber:

a) Classificação “binária” dos materiais:

Essa RNA foi treinada para apresentar o resultado utilizando dois neurônios na saída, de modo que para se obter a classificação dos materiais, a rede precisaria acertar a combinação binária representada no diagrama esquemático da Figura III.25.

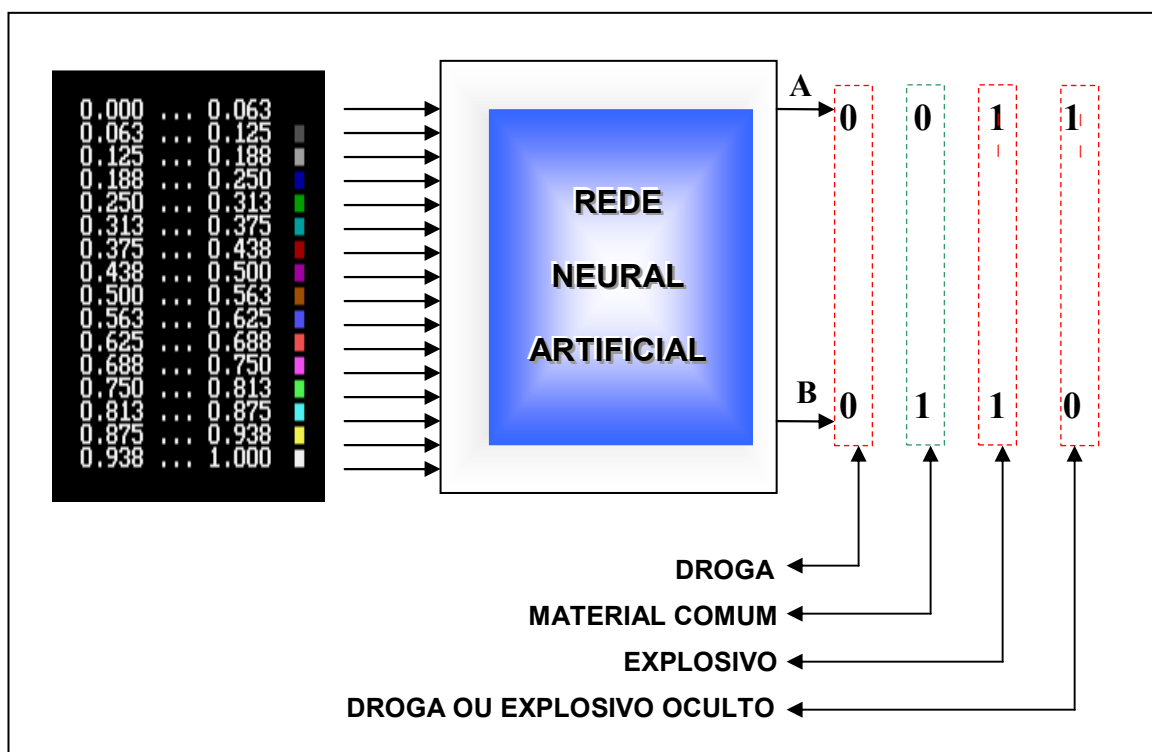


Figura III.25 – Diagrama esquemático da etapa de treinamento supervisionado de uma RNA com opção de saída do tipo binária.

b) Classificação “o maior é o vencedor”:

Essa RNA foi treinada para apresentar o resultado utilizando cinco neurônios na saída, de modo que para se obter a classificação dos materiais, bastava que a rede respondesse o maior valor na saída correspondente à classificação do material, conforme apresentado no diagrama esquemático da Figura III.26.

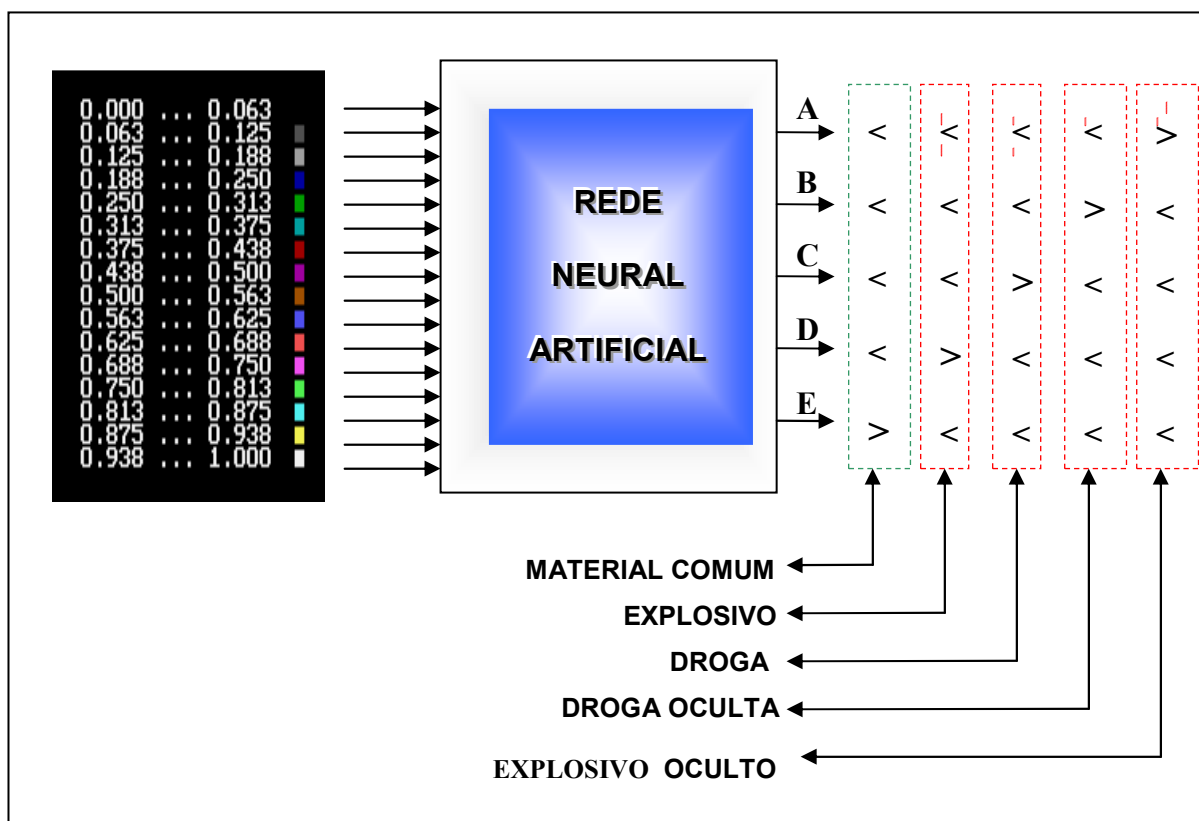


Figura III.26 – Diagrama esquemático da etapa de treinamento supervisionado de uma RNA com opção de saída do tipo, o maior é o vencedor.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho. Seguindo a seqüência descrita na metodologia, são apresentados: a caracterização do SEI para Neutrongrafia em Tempo Real, primordial para qualificação dos END realizados; em seguida, são apresentadas as imagens tomográficas reconstruídas dos diversos materiais inspecionados e os respectivos espectros de níveis de cores característicos; finalmente são apresentados os resultados obtidos no treinamento da RNA, responsável pela identificação dos materiais.

#### IV.1 – Caracterização do Sistema Neutronográfico em Tempo Real

A resolução do sistema neutronográfico em tempo real foi obtida pela relação entre os níveis de cinza da imagem na região ocupada por uma chapa de gadolínio de  $50 \mu m$  de espessura, fixada sobre a tela conversora e aquela correspondente ao feixe direto, conforme mostra a figura IV.1 (a). Na figura IV.1 (b), é apresentada a distribuição dos níveis de cinza ao longo da região de interface entre a chapa absorvedora e o feixe direto. Cada nível de cinza corresponde ao valor médio estimado para  $50 \text{ pixel}'s$ , para cada coordenada de varredura, resultando na função borda difusa ESF (equação II.15), ajustada pelo método dos mínimos quadrados, mostrada na figura IV.2 (b). Para as condições descritas, estimou-se que a resolução do sistema é de  $U_T = 444 \pm 22 \mu m$ . Na prática, isso significa que o SEI é capaz de discernir objetos diferentes que se encontrem separados por distâncias iguais ou superiores a  $444 \mu m$ . Para a aplicação a que se destina o sistema desenvolvido essa resolução é superior ao desejável.

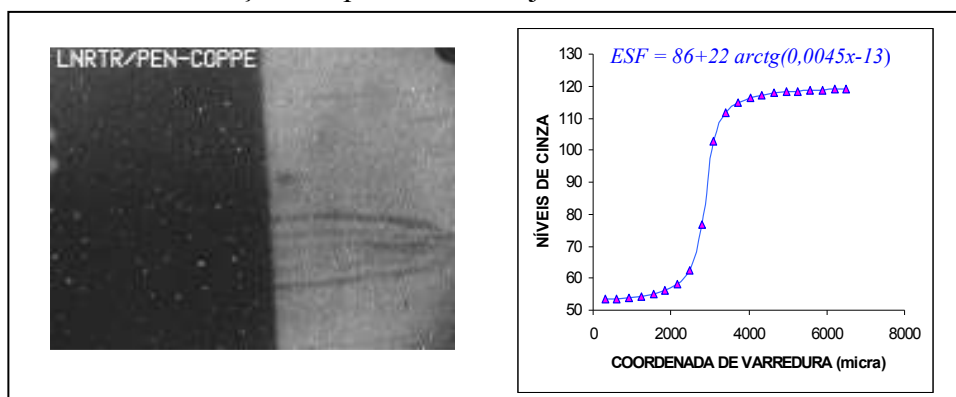


Figura IV.1 – (a) Imagem neutronográfica da região de interface entre uma chapa de gadolínio de  $50 \mu m$  de espessura e o feixe direto; (b) Distribuição de níveis de cinza na região de interface mostrada na figura (a).



A sensibilidade neutrongráfica foi avaliada pela imagem de um escalonado de *lucite*, com degraus de 2 mm e espessura máxima de 24 mm conforme descrito na seção III.1.1, cuja NRTR com o SEI pode ser vista na figura IV.2 (a). Na figura IV.2 (b), encontram-se dispostos os valores médios de níveis de cinza em cada degrau do escalonado, em função da espessura. O valor médio da sensibilidade calculado para o *lucite* foi de  $0,09 \pm 0,003 \text{ cm}$ , sendo compatível com os dados citados da literatura para sistemas em tempo real similares [30;32], demonstrando a alta eficiência e linearidade da conversão de nêutrons em fótons de luz pela tela cintiladora utilizada. Essas características são de fundamental importância para se registrar as diferentes composições dos materiais presentes nos objetos inspecionados e, até mesmo, pequenas diferenças de espessuras, o que possibilita a detecção de pequenos volumes de materiais ilícitos, mesmo em condições de ocultação.

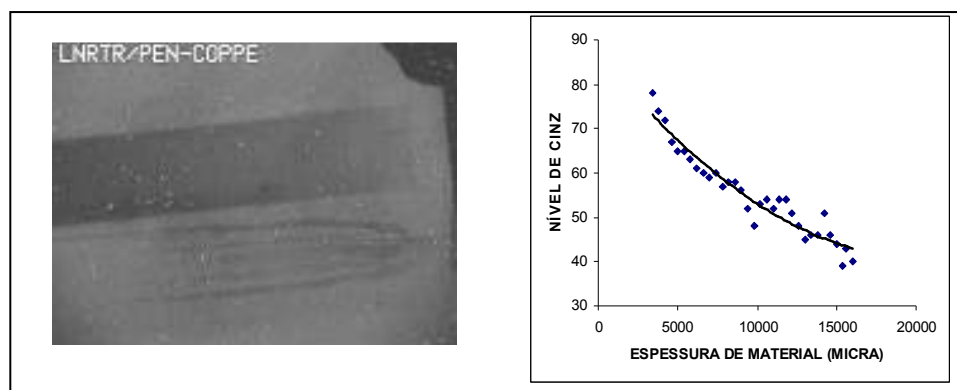


Figura IV.2 – (a) Imagem neutrongráfica em tempo real do escalonado de *lucite*; (b) Distribuição de níveis de cinza, em função da espessura dos degraus do escalonado de *lucite*.

Utilizando o SEI em tempo real, foram obtidas NRTR referentes aos indicadores de qualidade neutrongráfica: Indicador de Resolução Visual (IRV) e Indicador de Pureza de Feixe (IPF) descritos na seção III.1.1. Na figura IV.3, é apresentada a NRTR, do IPF e do IRV com o SEI.

Como pode ser observado, a imagem NRTR do IPF apresenta um bom contraste para materiais que possuem alta seção de choque de absorção de nêutrons térmicos, tais como os discos de nitrato de boro (BN) e as barras de cádmio, demonstrando que o SEI em tempo real foi capaz de discerní-los. A imagem NRTR do IRV apresenta resolução suficiente para a visualização dos orifícios com 1 mm de diâmetro, porém, os de 0,25 mm de diâmetro não foram visualizados, o que está compatível com a resolução  $U_T = 440 \mu\text{m}$  determinada, indicando que pequenas quantidades de materiais ilícitos podem ser visualizadas, mesmo em condições de ocultação. Esses resultados demonstram que o SEI em tempo real desenvolvido,

é compatível com outros sistemas descritos na literatura [32; 30] e, para a aplicação a que se destina, o sua qualificação é superior a necessária.

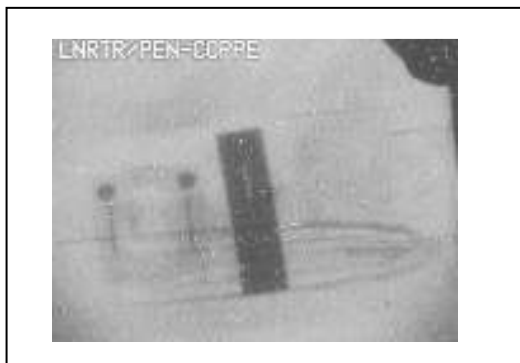


Figura IV.3 – Imagem neutronográfica em tempo real do IPF e IRV obtida com o SEI.

Uma vez definida a eficiência do SEI, de registrar imagens neutronográficas de boa qualidade, possibilitando a detecção de pequenos volumes de materiais ilícitos, mesmo quando ocultos, torna-se possível extrair as informações ou dados necessários à reconstrução tomográfica, utilizando-se o algoritmo ARIEM, descrito na seção III.1.4.

#### ***IV.2 – Imagens Tomográficas***

A escala apresentada na figura IV.4 relaciona a distribuição dos níveis de cores contidos nas imagens tomográficas a intervalos de atenuação, que representam a solução da função expressa pela equação II.22, conforme descrito na seção II.3.2.1.

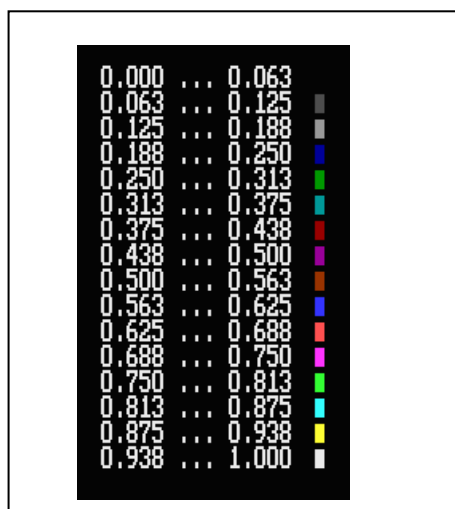


Figura IV.4 – Escala representativa da distribuição dos níveis de cores contidos nas imagens tomográficas.

Nas figuras IV.5 a IV.14, são apresentadas as imagens tomográficas, obtidas a partir dos dados de projeção gerados nas Neutronografias em Tempo Real, para cada tipo de amostra e as diversas condições de ocultação, assim como, seus respectivos espectros de níveis de cores característicos. Cabe destacar que é apresentada, apenas uma imagem tomográfica para cada amostra ou condição de ocultação inspecionada, sendo que no total, foram realizados 154 ensaios tomográficos.

A análise visual das imagens tomográficas reconstruídas, apresentadas nas figuras IV.5 a IV.14, demonstra uma fidelidade ao corpo de prova original, é possível observar-se a conformidade geométrica assumida pelo contorno cilíndrico de alumínio utilizado como porta amostra, apesar de apresentarem alguns detalhes espúrios introduzidos no cálculo matemático da reconstrução, já previstos conforme descrito por CRISPIM [17]. Cabe destacar que não se objetiva obter uma alta resolução de imagem tomográfica, mas, sim, a busca por informações ou comportamentos dos espectros de distribuição de níveis de cores que possam ser utilizados para localizar e identificar os materiais ilícitos. Como pode ser observado, o sistema visual humano é ineficiente para extrair essas informações contidas nas imagens tomográficas. Para se aumentar a eficiência de extração dessas informações, foram utilizadas técnicas de processamento digital que originaram os espectros de níveis de cores característicos.

As imagens tomográficas apresentadas na figura IV.5, mostram fidelidade aos corpos de prova originais, sendo possível observar detalhes, tais como, internamente as amostras de droga 3 (cocaína em pasta) e de droga 4 (cocaína em pedra), apresentam uma distribuição mais homogênea, podendo isso ser atribuído ao estado físico em que se encontram esses materiais, isto é, por serem sólidos.

A análise dos histogramas revela que as amostras de drogas 1, 2, 3 e 4 apresentam comportamentos equivalentes, indicando que estes materiais apresentam composições semelhantes, pequenas diferenças em amplitude estão relacionadas ao estado físico e pureza do material. Essa similaridade dos histogramas é fundamental para que a RNA identifique um comportamento que seja característico para essa classe de material e, dessa forma possa indicar a presença ou não de drogas nos objetos inspecionados.

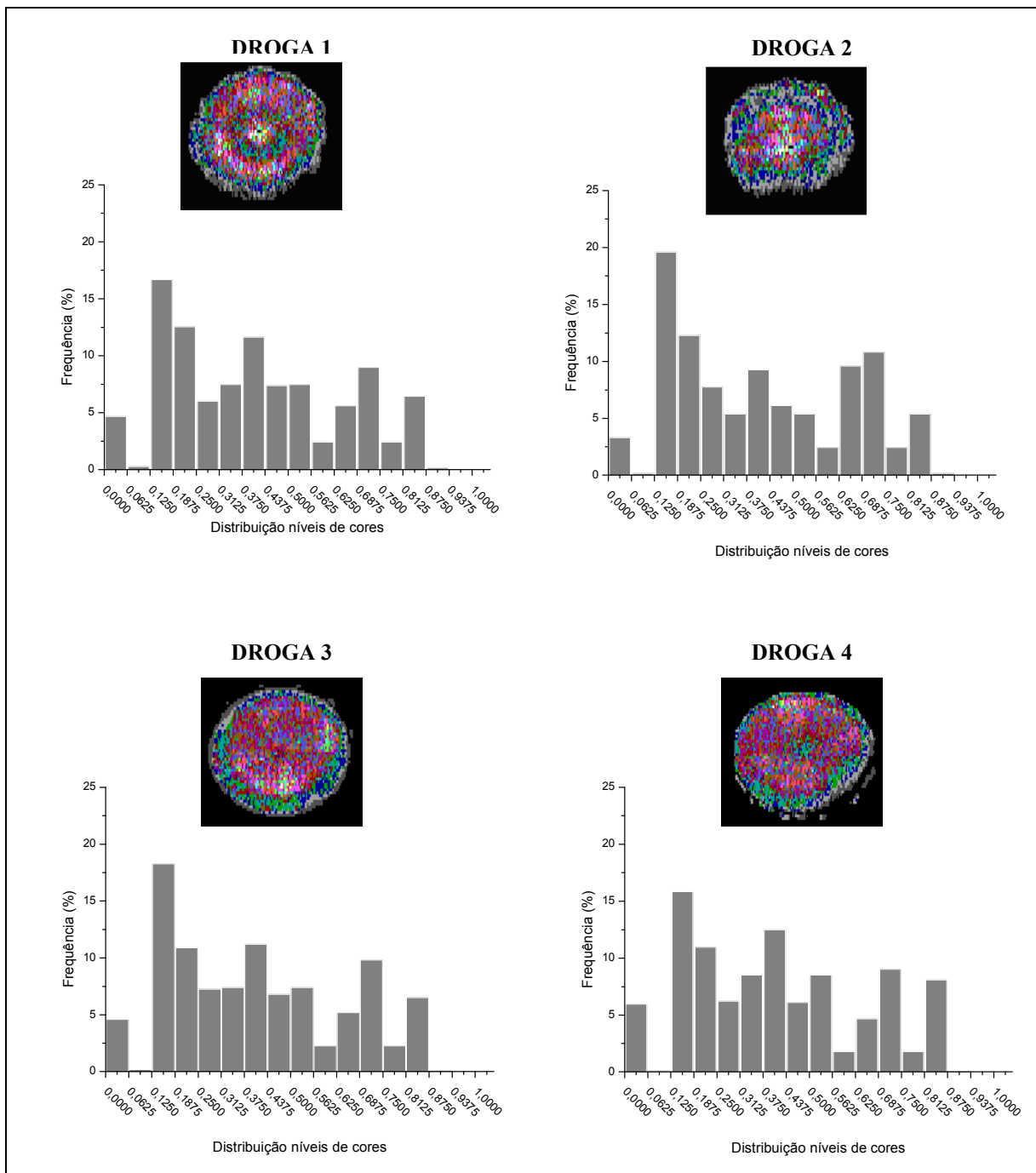


Figura IV.5 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cores característico de amostras contendo: droga 1 (cocaína em pó 50% de pureza); droga 2 (cocaína em pó 90% de pureza); droga 3 (cocaína em pasta) e droga 4 (cocaína em pedra).

A análise visual das imagens reconstruídas apresentadas na figura IV.6, mostra a fidelidade aos corpos de prova originais, sendo possível observar detalhes, tais como: na região onde se encontra o explosivo 1 ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) a distribuição é homogênea, enquanto que, na região do explosivo 2, é possível se identificar a carga de C4.

A análise dos histogramas mostra que as amostras de explosivos 1 e 2 apresentam comportamentos diferentes em relação aos demais materiais inspecionados, isto é, as maiores amplitudes dos espectros ocorrem para níveis de cores correspondentes à região central da escala. O espectro de níveis de cores característico obtido para a amostra de explosivo 1 ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) apresenta uma distribuição mais regular ao longo do espectro, principalmente nos níveis de cores intermediários. Quanto à amostra de explosivo 2 (C4) seu espectro característico apresenta dois picos superiores, nos intervalos de (0,315-0,375 e 0,500-0,563), o que o discrimina dos demais materiais inspecionados. Esse comportamento diferenciado é fundamental para que a RNA identifique um comportamento característico desse tipo de material e, dessa forma, indique a presença ou não de explosivos nos objetos inspecionados.

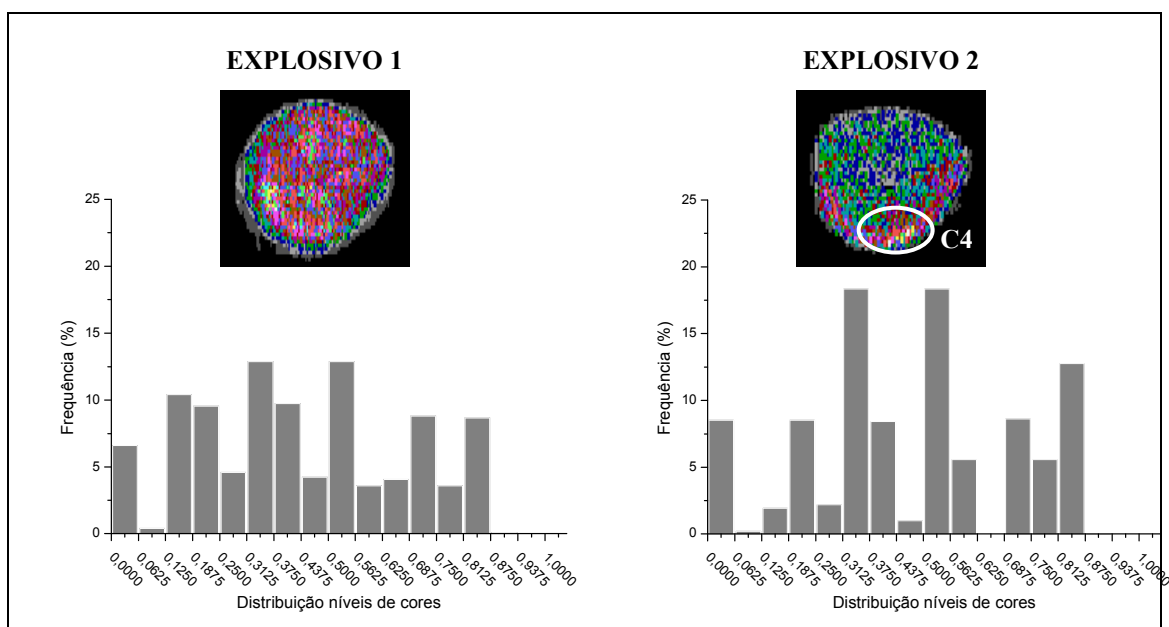


Figura IV.6 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos de amostras contendo: explosivo 1 (simulador de explosivo  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) explosivo 2 (segmento de explosivo, com carga de C4)

A análise visual das imagens reconstruídas apresentadas nas figuras IV.7, IV.8 e IV.9, demonstra detalhes quanto à distribuição interna do material, as imagens tomográficas correspondentes às amostras de açúcar, café, fumo, sal de frutas, talco e tecido mostram-se mais homogêneas, devido à facilidade de acomodação desses materiais no interior do porta amostra. Na imagem da amostra de batom, observa-se duas regiões distintas: uma, no centro, e outra, mais próxima da extremidade, o que pode ser explicado por diferenças de umidade do material. Na imagem da caneta esferográfica plástica, é

possível distinguir o revestimento externo, uma área vazia e a região com a carga de tinta. Na imagem da amostra de papel pode-se identificar uma parte central vazia, o que pode ser atribuído ao fato do papel ter sido enrolado, quando preenchia o interior do porta amostra, o que possibilitou que a parte central se desenrolasse, formando a região central vazia.

A análise dos histogramas é de difícil intercomparação, já que os materiais têm diferentes composições, sendo alguns homogêneos e outros heterogêneos. Contudo, pode-se observar que histogramas de alguns materiais apresentam comportamentos semelhantes em relação aos das amostras de drogas, tais como: açúcar, café, couro, talco e tecido. Isso pode confundir a RNA, na classificação dos materiais inspecionados. Quanto aos histogramas relativos aos demais materiais, apresentam comportamentos peculiares e, por isso, não devem ser confundidos com os dos materiais suspeitos.

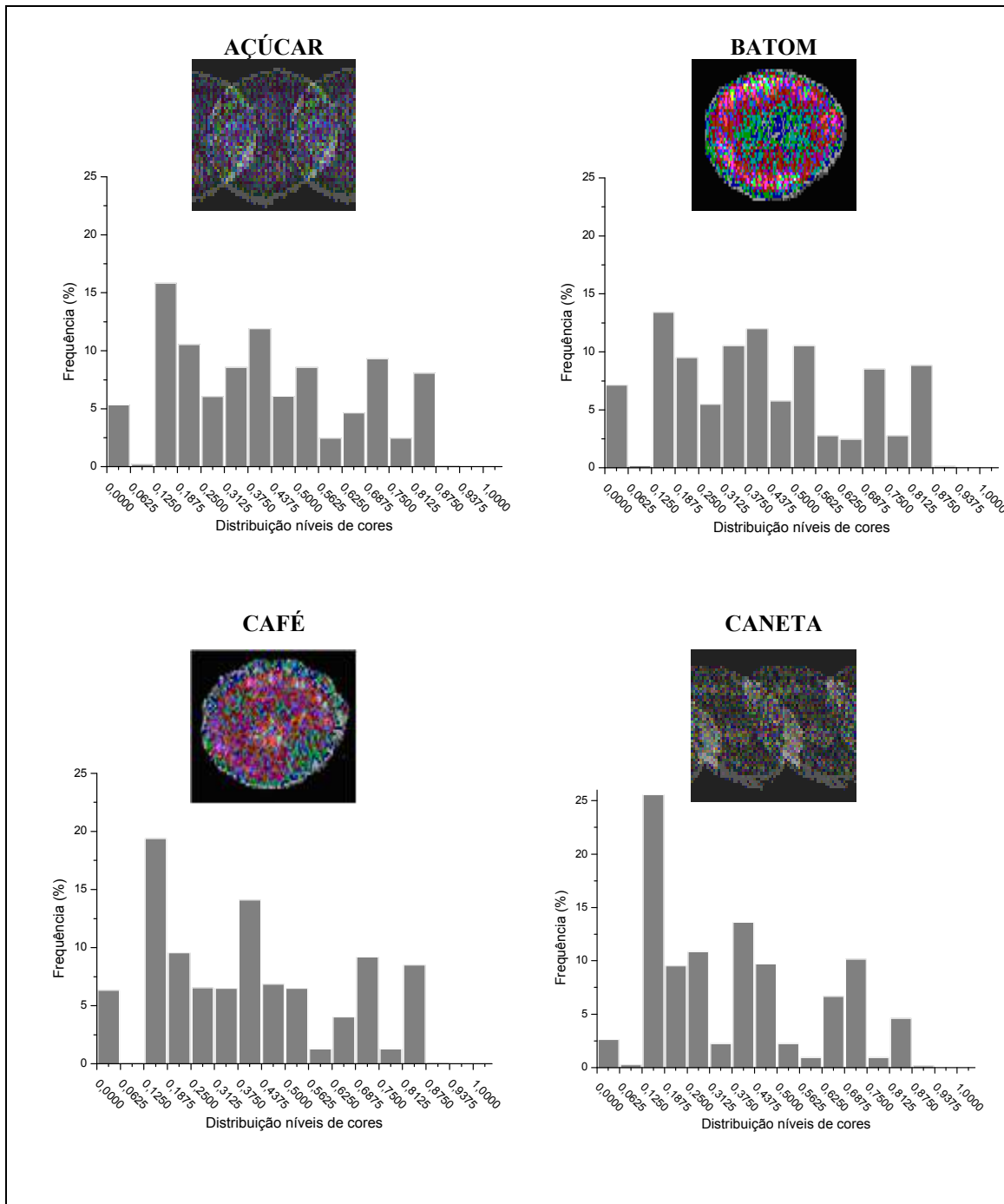


Figura IV.7 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos de amostras contendo: açúcar, batom, café e caneta.

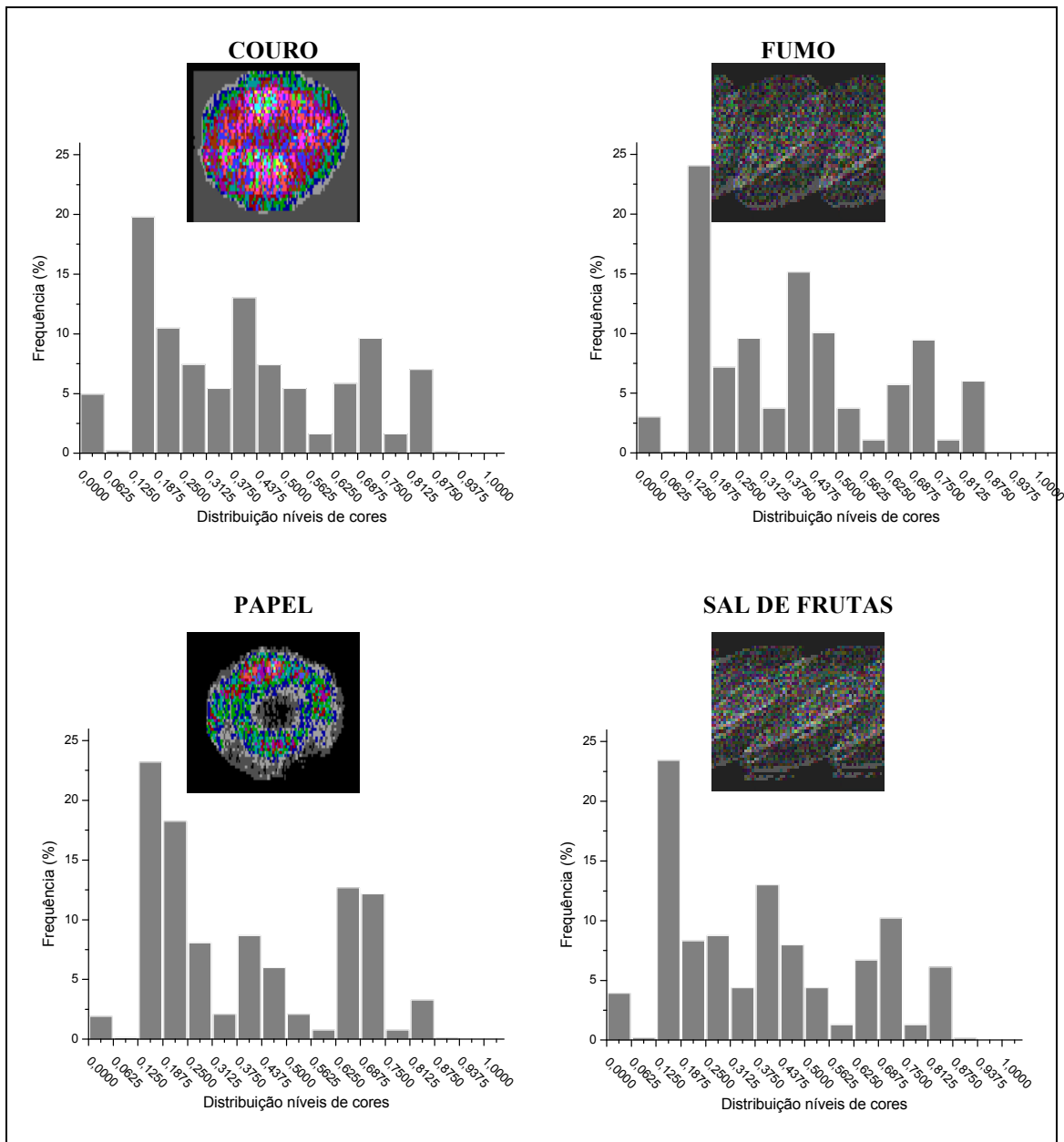


Figura IV.8 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos de amostras contendo: couro, fumo, papel e sal de frutas.



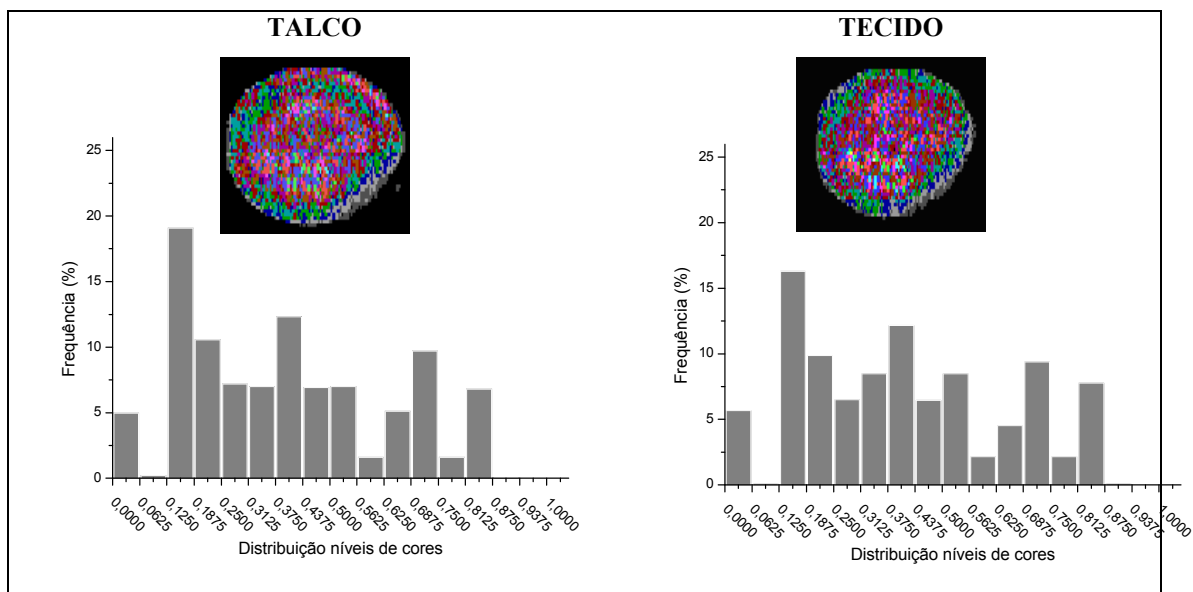


Figura IV.9 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos de amostras contendo: talco e tecido de algodão.

Nas imagens reconstruídas apresentadas nas figuras IV.10 e IV.11, é possível identificar-se duas regiões: uma central, onde está localizada a amostra de droga 3, e outra, mais externa, que indica a presença do material utilizado para ocultação.

Algumas imagens revelam detalhes peculiares, tais como: no arranjo de ocultação da amostra de droga 3 por ferro, existe uma região de vazio entre o cilindro de ferro utilizado para ocultação e o porta amostra, cujo desenho esquemático encontra-se na figura III.19. Esse detalhe é observado com nitidez na imagem reconstruída, apresentada na figura IV.10, onde é possível se verificar a centralização do porta-amostra no interior do cilindro de ferro. Na imagem relacionada à ocultação por fumo, observam-se algumas regiões de vazio na área preenchida com o fumo, o que significa que, na região referente a fatia da amostra reconstruída, o material de ocultação não foi bem compactado, dando origem aos espaços vazios, conforme se vê na figura IV.11.

Os histogramas mostrados nas figuras IV.10 e IV.11, para as condições de ocultação de drogas, apresentam comportamentos característicos que os diferenciam dos histogramas de drogas, explosivos e outros materiais nus, apresentados nas figuras IV.5 à IV.9. Observa-se que a região de ocultação por materiais diversos está representada, segundo a escala de distribuição de níveis de cores, mostrada na figura IV.4, no intervalo de 0,000 à 0,063, com intensidade percentual do espectro dessa distribuição, que caracteriza a

presença de cada material inspecionado, bem diferenciado (menor) do que na região onde está a droga, ressaltada pelo pico em níveis de cores que se estendem de 0,125 à 0,188. Essas diferenças são relevantes para o processo de classificação dos materiais pela RNA.

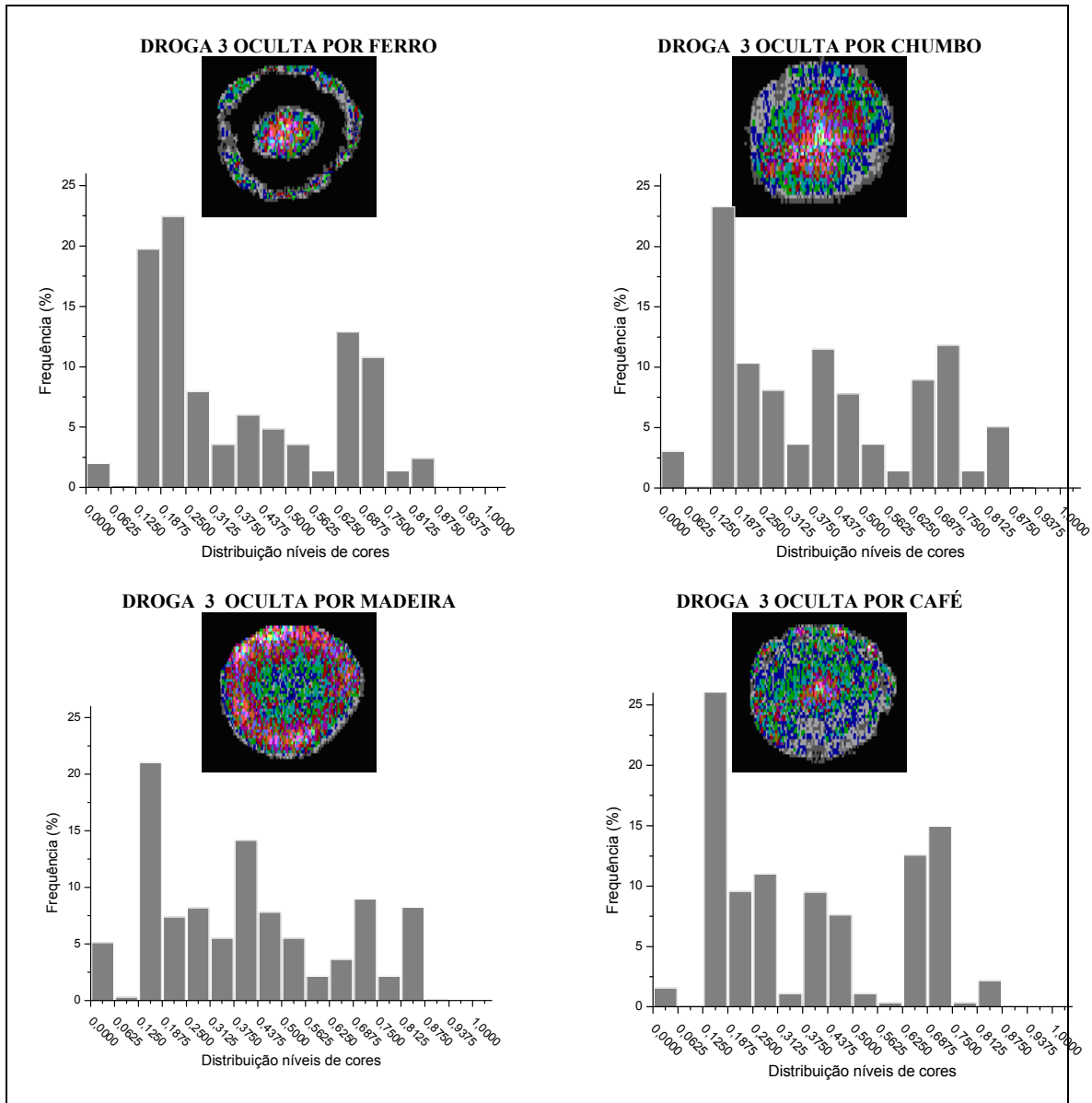


Figura IV.10 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos da amostra de droga 3 oculta por: ferro, chumbo, madeira e café.

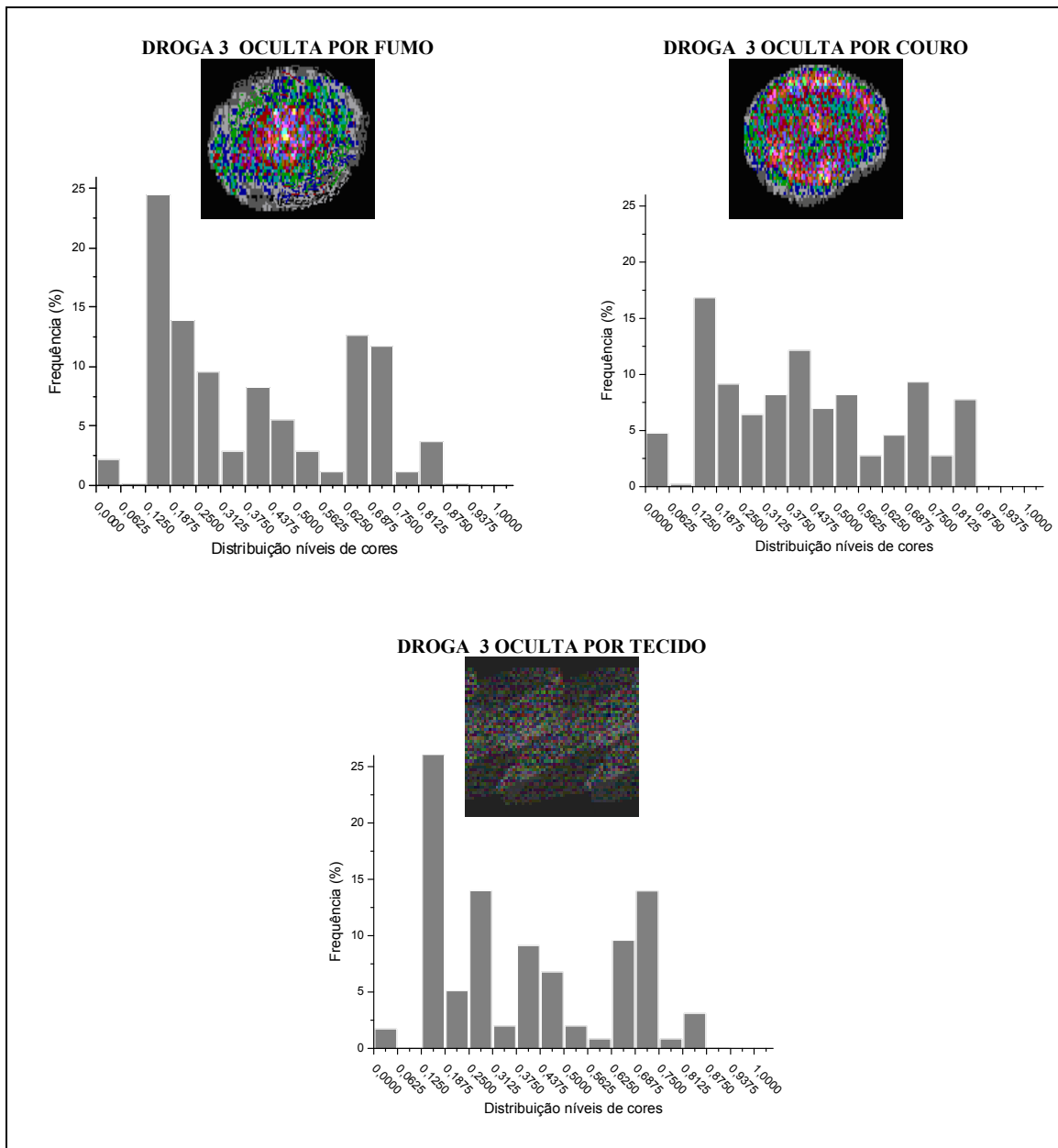


Figura IV.11 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos da amostra de droga 3 oculta por: fumo, couro e tecido.

A análise visual das imagens tomográficas obtidas para diferentes condições de ocultação de explosivos, apresentadas nas figuras IV.12 e IV.13, demonstra que em relação, as imagens tomográficas obtidas para as mesmas condições de ocultação de drogas, em todas as imagens foi possível identificar-se duas regiões: uma central, onde está localizada a amostra de explosivo 1, e outra, mais externa, que indica a presença do material utilizado para ocultação.

Algumas imagens revelam detalhes bastante peculiares, tais como: no arranjo de ocultação por ferro, existe uma região de vazio entre o cilindro de ferro utilizado para ocultação e o porta amostra, conforme desenho esquemático apresentado na figura III.19, que é observado com nitidez na imagem reconstruída, vista na figura IV.12, onde é possível se verificar que o porta amostra não está centralizado no interior do cilindro de ferro. Além disso, em comparação com a imagem de droga 3 oculta vide Figura IV.10, observa-se uma diferença entre os diâmetros dos portas-amostra, conforme descrito na seção III.2.1. Na imagem de ocultação por fumo, notam-se algumas regiões de vazio na área preenchida com o fumo, indicando que, na região referente à fatia da amostra reconstruída, o material de ocultação não estava completamente compactado, dando origem aos espaços vazios.

Os histogramas obtidos para as condições de ocultação de explosivos apresentam comportamentos característicos que os diferenciam dos histogramas relativos às amostras nuas de drogas, explosivos e outros materiais, porém com algumas semelhanças em relação aos histogramas obtidos para as condições de ocultação de droga, a saber: no intervalo de 0,000 a 0,0625, com intensidade percentual do espectro dessa distribuição, que caracteriza, bem diferenciado (menor) do que na região onde está a droga, ressaltada pelo pico em níveis de cores que se estendem de 0,1250 a 0,1875. Essa semelhança entre os histogramas obtidos nas condições de ocultação de drogas e explosivos pode ser atribuída ao fato de que estas imagens tomográficas referem-se às mesmas condições de ocultação. Quando se comparam as imagens tomográficas de drogas e explosivos ocultas pelos mesmos materiais, observa-se que as regiões referentes às ocultações se assemelham.

As diferenças em relação às drogas, explosivos e outros materiais são relevantes para o processo de classificação dos materiais, enquanto que a semelhança em relação à ocultação de drogas pode confundir a RNA, ao tentar identificar o tipo de material, droga ou explosivo, que está sob ocultação.

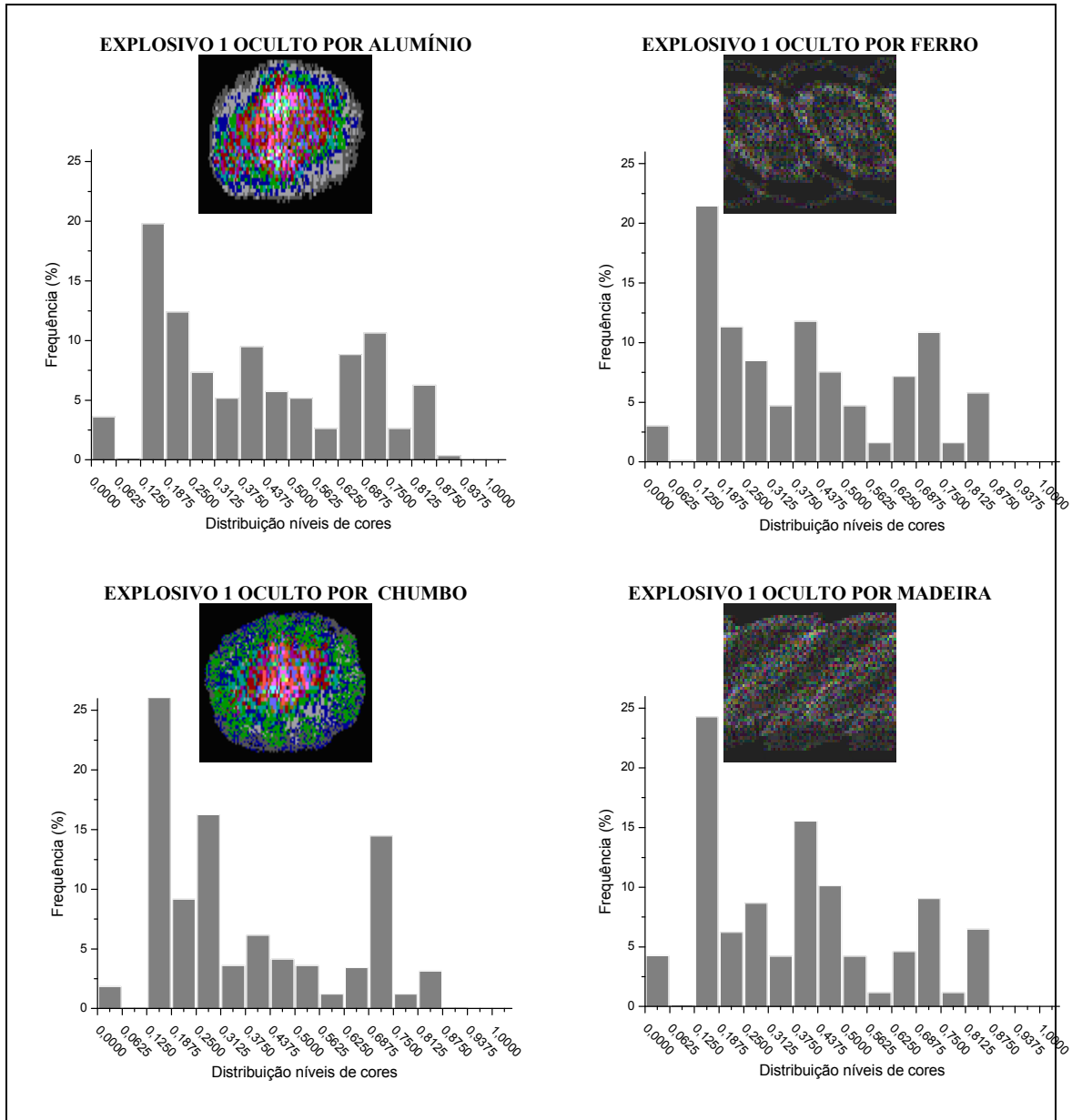


Figura IV.12 -Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos da amostra explosivo 1 oculta por: alumínio, ferro, chumbo e madeira.

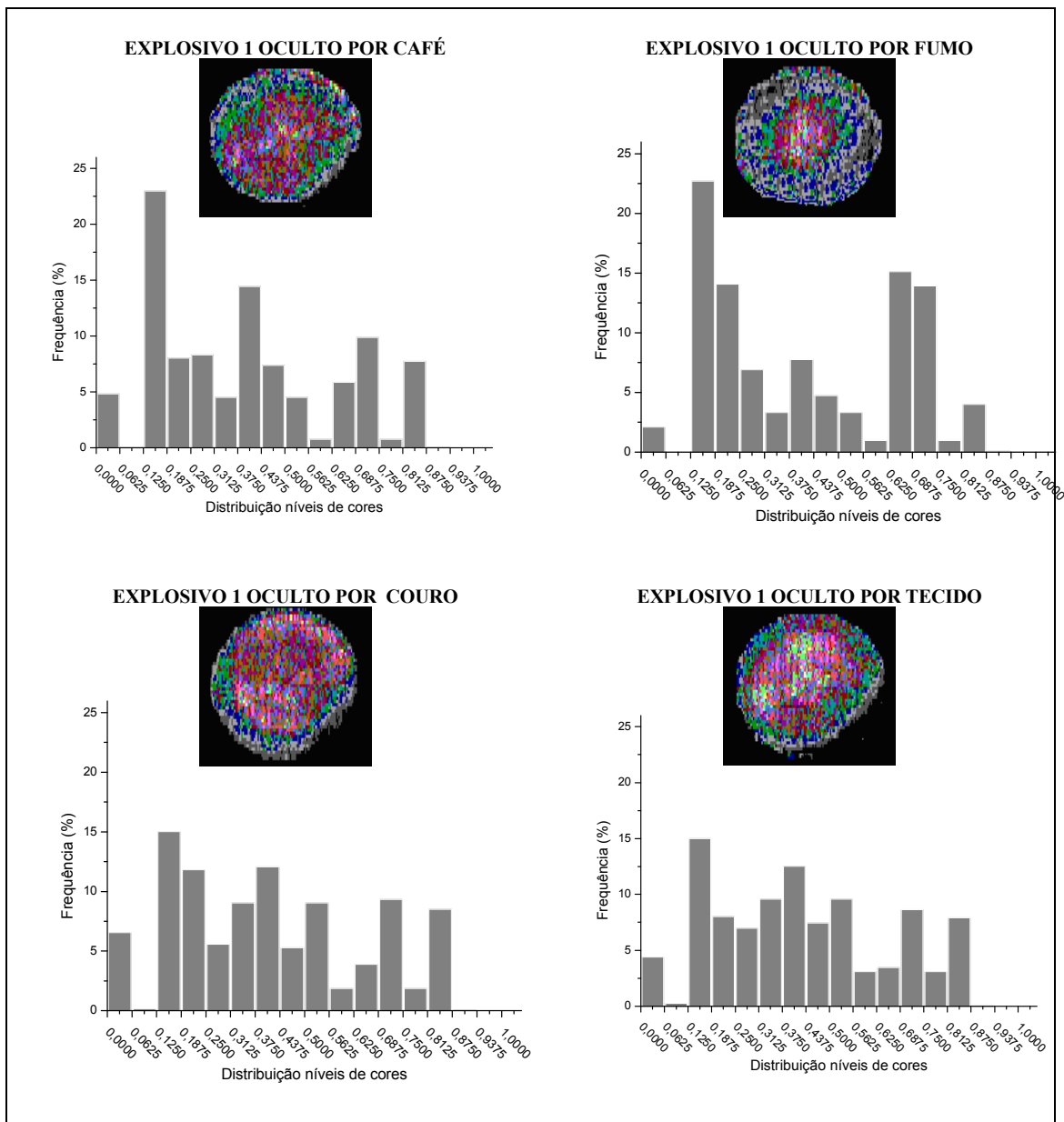


Figura IV.13 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cor característicos da amostra de explosivo 1 oculta por: café, fumo, couro e tecido.

Na análise visual da imagem tomográfica obtida para o arranjo experimental composto por quatro materiais de diferente constituição, apresentada na figura IV.14, é possível observar-se detalhes, tais como, a distribuição dos quatro corpos de prova, conforme apresentada na figura III.22. Além da visualização distinta de cada amostra, é possível verificar-se a forma circular e o contorno mais externo representativo do cilindro de alumínio utilizado em cada um dos portas-amostra. Essas informações são de fundamental importância para a aplicação a que se destina o sistema desenvolvido, pois,

dessa forma, torna-se possível a localização precisa do material ilícito dentro de uma bagagem ou postal. Para o caso do material ilícito ser droga isso pode não ser importante, mas, no caso da presença de explosivo plástico essa informação permitirá uma atuação segura do profissional ao desativar o artefato explosivo.

A análise dos histogramas mostrados na figura IV.14 revela que, apesar do número de discretização da malha na região que compreende cada corpo de prova ser menor, em relação aos ensaios realizados separadamente com as amostras, que os materiais ilícitos foram bem diferenciados entre si. Isso motivou se optar pela normalização no nível de discretização da malha pela distribuição de níveis de cores. Os espectros obtidos resultaram muito parecidos com os espectros de distribuição de níveis de cores característicos de cada material, sendo esse comportamento vantajoso, na identificação dos materiais pela RNA.

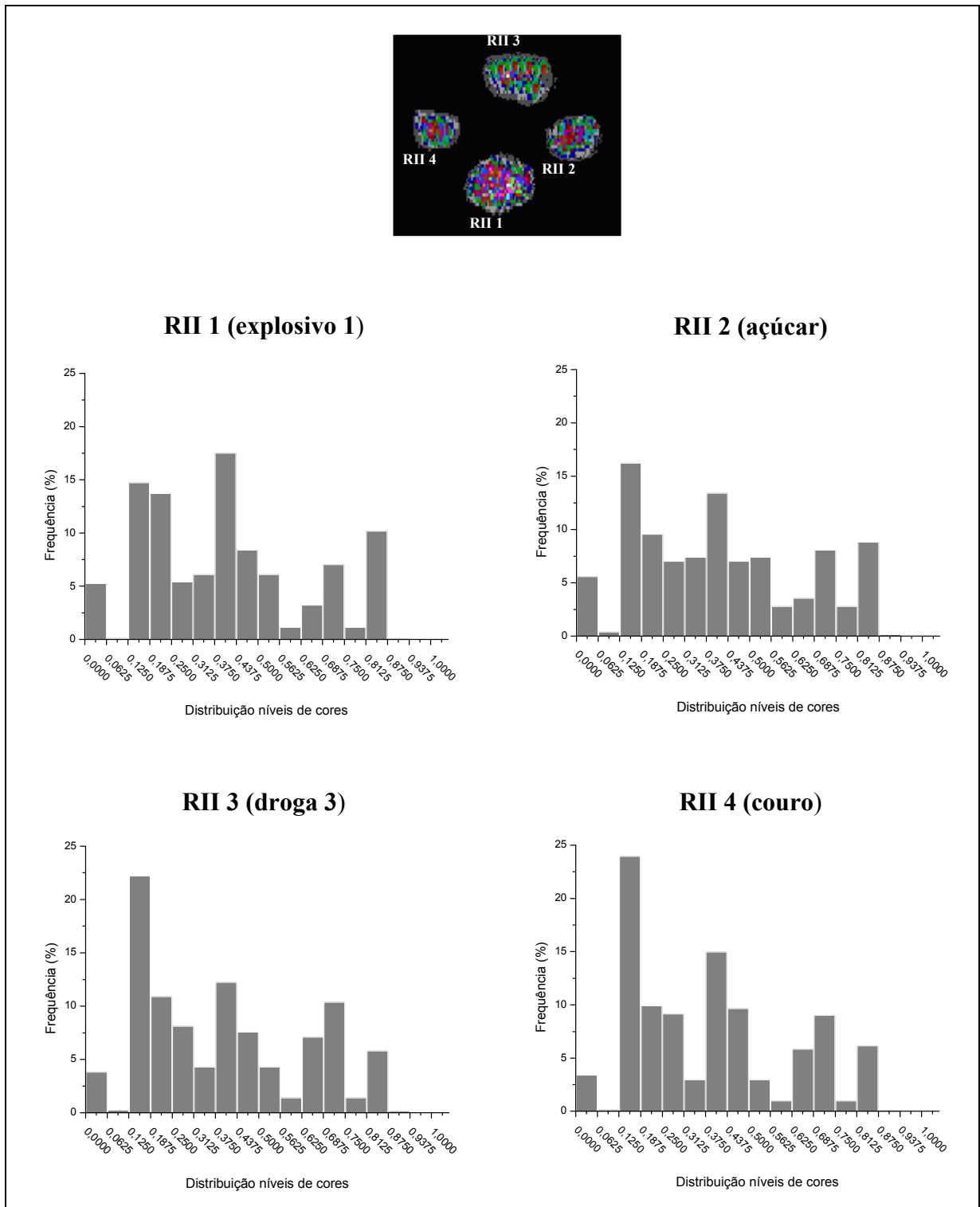


Figura IV.14 - Imagens tomográficas e respectivos espectros de níveis de cores característico do objeto composto pelas amostras de: droga 3, açúcar, explosivo 1 e couro.



### ***IV.3 – Resposta da RNA para a identificação de drogas e explosivos a partir de imagens tomográficas***

Objetivando-se verificar a potencialidade dessa técnica de Inteligência Artificial na solução do problema proposto, diversas RNA's foram treinadas, obtendo-se índices de acertos na classificação na faixa de 85 % a 97 %. Para se demonstrar o uso da técnica de RNA são apresentados os resultados obtidos com duas RNA's: 1) RNA “binária” e 2) RNA “o maior é o vencedor”, descritas na seção III.2.3.

#### 1) Rede Neural Artificial “***binária***”

Os parâmetros de treinamento da RNA “binária” que resultaram as melhores respostas são apresentados na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Parâmetros de treinamento da RNA utilizados na rede do tipo “binária”.

PARÂMETROS	CAMADAS				
	ENTRADA	INTERMEDIÁRIA			SAÍDA
FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO	Linear [-1,1]	Gaussian	Tanh	Gaussian Complementa	Logistic
NEURÔNIOS	16	6	6	6	2
Taxa de aprendizagem $\eta = 0,01$		Momento = 0,1		Peso= 0,3	
Tempo de treinamento = 20 segundos					

Os resultados da predição com a RNA do tipo “binária” são apresentados nas Tabelas IV.2, IV.3 e IV.4, para os conjuntos de treinamento, teste e produção, respectivamente.

Tabela IV.2 – Predição da RNA “binária” para o conjunto de treinamento.

AMOSTRA (ENSAIO)	PREDIÇÃO DA RNA		CLASSIFICAÇÃO
	A	B	
Açúcar (5)	0	1	certo
Caneta (5)	0	1	certo
Cigarro (5)	0	1	certo
Couro (5)	0	1	certo
Explosivo 2 (5)	1	1	certo
Papel (5)	0	1	certo
sal de frutas (5)	0	1	certo
Explosivo 1 (5)	1	1	certo
Tecido (5)	0	1	certo
Tecido (4)	0	1	certo
Droga 2 (5)	0	0	certo
Droga 3 (5)	0	0	certo
Droga 4 (5)	0	0	certo
Explosivo 2 (3)	1	1	certo
Explosivo 1 (4)	1	1	certo
Café (5)	0	1	certo
Batom (5)	0	1	certo
Couro (4)	0	1	certo
Talco (5)	0	1	certo
Tecido (2)	0	1	certo
Açúcar (4)	0	1	certo
Droga 1 (5)	0	0	certo
Droga 2 (4)	0	0	certo
Droga 3 (4)	0	0	certo
Droga 4 (4)	0	0	certo
Explosivo 2 (1)	1	1	certo
Explosivo 1 (1)	1	1	certo
Açúcar (1)	0	1	certo
Talco (4)	0	1	certo
Couro (1)	0	1	certo
Batom (4)	0	1	certo
Batom (1)	0	1	certo
Droga 1 (4)	0	0	certo
Droga 2 (1)	0	0	certo
Droga 3 (1)	0	0	certo
Droga 4 (1)	0	0	certo
Açúcar (3)	0	1	certo
Batom (3)	0	1	certo
Açúcar (objeto composto 1 - RII 2)	0	1	certo
Açúcar (7)	0	1	certo
Droga 1 (1)	0	0	certo
Droga 3 (objeto composto 1 – RII 3)	0	0	certo
Droga 2 (6)	0	0	certo
Droga 2 (7)	0	0	certo
Droga 3 (6)	0	0	certo

Tabela IV.2: continuação

Droga 3 (8)	0	0	certo
Droga 4 (6)	0	0	certo
Droga 4 (8)	0	0	certo
Droga 4 (9)	0	0	certo
Café (4)	0	1	certo
Café (1)	0	1	certo
Caneta (4)	0	1	certo
Cigarro (4)	0	1	certo
Couro (6)	0	1	certo
Couro (objeto composto 1 – RII 4)	0	1	certo
Explosivo 1(6)	1	1	certo
Explosivo 2 (6)	1	1	certo
Papel (4)	0	1	certo
Papel (1)	0	1	certo
Papel (7)	0	1	certo
Sal de frutas (3)	0	1	certo
Cigarro (3)	0	1	certo
Sal de frutas (4)	0	1	certo
Explosivo 1 (objeto composto 1 – RII 1)	1	1	certo
Explosivo 2 (7)	1	1	certo
Talco (1)	0	1	certo
Tecido (6)	0	1	certo
Açúcar (6)	0	1	certo
Droga 1 (6)	0	0	certo
Droga 3 (7)	0	0	certo
Droga 3 oculta por ferro (1)	1	0	certo
Droga 3 oculta por café (1)	1	0	certo
Droga 3 oculta por chumbo (1)	1	0	certo
Droga 3 oculta por couro (1)	1	0	certo
Droga 3 oculta por fumo (1)	1	0	certo
Droga 3 oculta por madeira (1)	1	0	certo
Droga 3 oculta por tecido (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por alumínio (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por café (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por chumbo (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por couro (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por ferro (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por fumo (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por tecido (1)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por madeira (1)	1	0	certo

Tabela IV.3 – Predição com a RNA do tipo “binária” para o conjunto de teste.

AMOSTRA (ENSAIO)	PREDIÇÃO DA RNA		CLASSIFICAÇÃO
	A	B	
Droga 4 (2)	0	0	certo
Café (2)	0	1	certo
Caneta (3)	0	1	certo
Cigarro (2)	0	1	certo
Couro (3)	0	1	certo
Explosivo 2 (2)	1	1	certo
Papel (2)	0	1	certo
Açúcar ((objeto composto2 – RII 2)	0	1	certo
Explosivo 1 (3)	1	1	certo
Talco (3)	0	1	certo
Tecido (1)	0	1	certo
Batom (6)	0	1	certo
Droga 1 (2)	0	0	certo
Droga 2 (3)	0	0	certo
Droga 3 (objeto composto 2 – RII 3)	0	0	certo
Droga 4 (6)	1	0	<b>trocou</b>
Droga 3 (2)	0	0	certo
Sal de frutas (1)	0	0	<b>Falso Positivo</b>
Explosivo 1 ((objeto composto 2 – RII 1	1	1	certo
Couro ((objeto composto 2 – RII 4)	0	1	certo
Droga 3 oculta por ferro (2)	1	0	certo
Droga 3 oculta por café (2)	1	0	certo
Droga 3 oculta por chumbo (2)	1	0	certo
Droga 3 oculta por couro (2)	1	0	certo
Droga 3 oculta por fumo (2)	1	0	certo
Droga 3 oculta por madeira (2)	1	0	certo
Droga 3 oculta por tecido (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por alumínio (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por café (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por chumbo (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por couro (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por ferro (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por fumo (2)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por tecido (2)	1	0	certo

Tabela IV.4 – Predição com a RNA “binária” para o conjunto de produção.

AMOSTRA (ENSAIO)	PREDIÇÃO DA RNA		CLASSIFICAÇÃO
	A	B	
Tecido (3)	0	1	certo
Açúcar (2)	0	1	certo
Droga 1 (3)	0	0	certo
			<b>Falso Negativo</b>
Droga 2 (2)	0	1	
Droga 3 (3)	0	0	certo
Droga 4 (3)	0	0	certo
Café (3)	0	1	certo
Droga 3 (objeto composto 3 – RII 3)	0	0	certo
Açúcar (objeto composto 3 – RII 2)	0	1	certo
Cigarro (6)	0	1	certo
Couro (2)	0	1	certo
Talco (2)	0	1	certo
			<b>Falso Positivo</b>
Papel (3)	0	0	
Sal de frutas (2)	0	1	certo
			<b>Falso Negativo</b>
Explosivo 2 (4)	0	1	
Explosivo 1 (2)	1	1	certo
Talco (7)	0	1	certo
Caneta (2)	0	1	certo
Batom (2)	0	1	certo
Droga 3 oculta por ferro (3)	1	0	certo
Droga 3 oculta por café (3)	1	0	certo
Droga 3 oculta por chumbo (3)	1	0	certo
Droga 3 oculta por couro (3)	1	0	certo
Droga 3 oculta por fumo (3)	1	0	certo
Droga 3 oculta por madeira (3)	1	0	certo
Droga 3 oculta por tecido (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por alumínio (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por café (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por chumbo (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por couro (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por ferro (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por fumo (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por tecido (3)	1	0	certo
Explosivo 1 oculto por madeira (3)	1	0	certo

Os resultados apresentados nas tabelas IV.2, IV.3 e IV.4 mostraram que a RNA do tipo “binária”, apresentou índices de 97,40 % de acertos de classificação e 2,60 % de erros, sendo 1,30 % de falso positivo e 1,30 % de falso negativo.

Algumas considerações sobre as respostas da RNA do tipo “binária” são:

- Na interpretação dos resultados, considerou-se como identificado o grupo de materiais relacionados com a combinação binária (saídas A e B) correspondente, conforme descrito na seção III.2.3 (Figura III.25).
- Considerou-se como acerto de classificação o único caso em que a rede trocou a condição de droga nua pela de droga oculta, porque a rede não deixou de reconhecer o material ilícito.
- Nos casos em que RNA errou a classificação do material, não foi possível se estabelecer uma correlação, pois não houve erros sistemáticos aos quais se possa associar uma correspondência.

As respostas desta RNA, para os conjuntos de Treinamento, Teste e Produção, resultaram em uma boa convergência da rede sobre os conjuntos de perfis apresentados e, dessa forma, demonstraram o potencial de aplicação da técnica na classificação de materiais, a partir de imagens tomográficas.

## 2) Rede Neural Artificial “*o maior é o vencedor*”.

Os parâmetros de treinamento da RNA “o maior é o vencedor” que resultaram as melhores respostas são apresentados na Tabela IV.5.

Tabela IV.5 – Parâmetros de treinamento da RNA utilizados na rede do tipo “o maior é o vencedor”.

PARÂMETROS	CAMADAS				
	ENTRADA	INTERMEDIÁRIA			SAÍDA
FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO	Linear [-1,1]	Gaussian	Tanh	Gaussian Complementa	Logistic
NEURÔNIOS	16	6	6	6	5
	Taxa de aprendizagem $\eta = 0,01$		Momento = 0,1	Peso= 0,3	
	Tempo de treinamento = 20 segundos				

Os resultados da predição da RNA “o maior é o vencedor” são apresentados nas tabelas IV.6, IV.7 e IV.8, respectivamente,

Tabela IV.6 – Predição com a RNA “o maior é o vencedor” para o conjunto de treinamento.

AMOSTRA (ENSAIO)	PREDIÇÃO RNA					CLASSIFICAÇÃO
	A	B	C	D	E	
Açúcar (5)	0,00	0,00	0,00	0,42	0,80	certo
Caneta (5)	0,00	0,05	0,00	0,22	0,99	certo
Cigarro (5)	0,00	0,08	0,00	0,19	1,00	certo
Couro (5)	0,00	0,03	0,00	0,11	1,00	certo
Explosivo 2 (5)	0,00	0,02	0,16	0,30	0,49	Falso Negativo
Papel (5)	0,00	0,02	0,31	0,00	0,77	certo
sal de frutas (5)	0,00	0,04	0,20	0,09	0,64	certo
Explosivo 1 (5)	0,00	0,03	0,01	0,54	0,48	certo
Tecido (5)	0,00	0,03	0,02	0,10	0,93	certo
Tecido (4)	0,00	0,00	0,20	0,09	0,63	certo
Droga 2 (5)	0,00	0,09	1,00	0,05	0,00	certo
Droga 3 (5)	0,00	0,01	0,63	0,09	0,23	certo
Droga 4 (5)	0,00	0,01	0,49	0,00	0,52	Falso Negativo
Explosivo 2 (3)	0,00	0,02	0,04	1,00	0,00	certo
Explosivo 1 (4)	0,00	0,00	0,00	0,95	0,07	certo
Café (5)	0,00	0,01	0,05	0,00	0,96	certo
Batom (5)	0,00	0,07	0,00	0,19	1,00	certo
Couro (4)	0,00	0,03	0,21	0,05	0,75	certo
Talco (5)	0,00	0,04	0,00	0,07	0,97	certo
Tecido (2)	0,00	0,08	0,12	0,32	0,51	certo
Açúcar (4)	0,00	0,00	0,10	0,15	0,68	certo
Droga 1 (5)	0,00	0,11	0,98	0,20	0,00	certo
Droga 2 (4)	0,00	0,06	0,46	0,11	0,40	certo
Droga 3 (4)	0,00	0,01	0,63	0,18	0,16	certo
Droga 4 (4)	0,00	0,12	0,63	0,54	0,00	certo
Explosivo 2 (1)	0,02	0,00	0,00	1,00	0,00	certo
Explosivo 1 (1)	0,00	0,00	0,00	0,99	0,10	certo
Açúcar (1)	0,01	0,00	0,17	0,21	0,49	certo
Talco (4)	0,00	0,06	0,40	0,15	0,33	Falso Positivo
Couro (1)	0,00	0,05	0,19	0,15	0,62	certo
Batom (4)	0,00	0,06	0,00	0,14	1,00	certo
Batom (1)	0,05	0,00	0,00	0,09	1,00	certo
Droga 1 (4)	0,00	0,06	0,08	0,08	0,86	Falso Negativo
Droga 2 (1)	0,00	0,02	1,00	0,02	0,00	certo
Droga 3 (1)	0,00	0,00	0,51	0,11	0,30	certo
Droga 4 (1)	0,00	0,17	0,69	0,00	0,24	certo
Açúcar (3)	0,00	0,00	0,01	0,32	0,75	certo
Batom (3)	0,00	0,00	0,17	0,02	0,81	certo

Tabela IV.6 - continuação

Açúcar (objeto composto 1 - RII 2)	0,00	0,00	0,10	0,11	0,80	certo
Açúcar (7)	0,03	0,00	0,01	0,12	0,86	certo
Droga 1 (1)	0,00	0,08	0,26	0,29	0,40	Falso Negativo
Droga 3 (objeto composto 1 – RII 3)	0,00	0,00	0,19	0,40	0,32	trocou
Droga 2 (6)	0,00	0,01	0,10	0,11	0,83	Falso Negativo
Droga 2 (7)	0,00	0,11	0,77	0,00	0,31	certo
Droga 3 (6)	0,00	0,01	0,85	0,09	0,08	certo
Droga 3 (8)	0,00	0,01	0,85	0,09	0,08	certo
Droga 4 (6)	0,00	0,02	1,00	0,00	0,01	certo
Droga 4 (8)	0,00	0,03	0,66	0,07	0,28	certo
Droga 4 (9)	0,00	0,03	0,66	0,07	0,28	certo
Café (4)	0,00	0,04	0,12	0,13	0,78	certo
Café (1)	0,00	0,03	0,06	0,25	0,72	certo
Caneta (4)	0,00	0,03	0,05	0,19	0,84	certo
Cigarro (4)	0,00	0,04	0,03	0,09	0,93	certo
Couro (6)	0,00	0,04	0,00	0,13	0,96	certo
Couro (objeto composto 1– RII 4)	0,00	0,02	0,00	0,07	1,00	certo
Explosivo 1(6)	0,01	0,00	0,19	0,47	0,30	certo
Explosivo 2 (6)	0,00	0,14	0,00	0,28	0,81	Falso Negativo
Papel (4)	0,00	0,08	0,00	0,00	1,00	certo
Papel (1)	0,00	0,06	0,00	0,00	1,00	certo
Papel (7)	0,00	0,01	0,29	0,00	0,91	certo
Sal de frutas (3)	0,00	0,16	0,00	0,09	0,93	certo
Cigarro (3)	0,00	0,06	0,09	0,16	0,73	certo
Sal de frutas (4)	0,00	0,07	0,00	0,14	0,95	certo
Explosivo 1 (objeto composto 1 – RII 1)	0,00	0,00	0,32	0,22	0,26	trocou
Explosivo 2 (7)	0,00	0,03	0,14	0,40	0,38	certo
Talco (1)	0,00	0,01	0,00	0,06	1,00	certo
Tecido (6)	0,00	0,01	0,00	0,10	0,93	certo
Açúcar (6)	0,06	0,00	0,00	0,06	1,00	certo
Droga 1 (6)	0,00	0,07	0,20	0,16	0,59	Falso Negativo
Droga 3 (7)	0,00	0,02	0,56	0,16	0,21	certo
Droga 3 oculta por ferro (1)	0,12	0,89	0,01	0,01	0,00	certo
Droga 3 oculta por café (1)	0,02	0,98	0,00	0,00	0,07	certo
Droga 3 oculta por chumbo (1)	0,17	0,83	0,00	0,01	0,00	certo
Droga 3 oculta por couro (1)	0,36	0,65	0,00	0,04	0,00	certo
Droga 3 oculta por fumo (1)	0,03	0,98	0,03	0,00	0,00	certo
Droga 3 oculta por madeira (1)	0,35	0,66	0,01	0,06	0,00	certo
Droga 3 oculta por tecido (1)	0,20	0,79	0,00	0,00	0,11	certo
Explosivo 1 oculto por alumínio (1)	0,88	0,11	0,00	0,01	0,10	certo
Explosivo 1 oculto por café (1)	0,53	0,51	0,00	0,06	0,00	Certo
Explosivo 1 oculto por chumbo (1)	0,57	0,40	0,00	0,00	0,06	certo
Explosivo 1 oculto por couro (1)	0,30	0,70	0,02	0,08	0,00	trocou
Explosivo 1 oculto por ferro (1)	0,66	0,36	0,00	0,00	0,11	certo
Explosivo 1 oculto por fumo (1)	0,72	0,25	0,00	0,00	0,05	certo
Explosivo 1 oculto por tecido (1)	0,30	0,72	0,00	0,05	0,00	trocou
Explosivo 1 oculto por madeira (1)	0,61	0,42	0,00	0,06	0,01	certo



Tabela IV.7 – Predição com a RNA “o maior é o vencedor” para o conjunto de teste.

AMOSTRA (ENSAIO)	PREDIÇÃO RNA					IDENTIFICAÇÃO
	A	B	C	D	E	
Droga 4 (2)	0,00	0,02	1,00	0,00	0,01	certo
Café (2)	0,00	0,09	0,13	0,29	0,60	certo
Caneta (3)	0,00	0,33	0,00	0,25	0,79	certo
Cigarro (2)	0,00	0,13	0,00	0,30	1,00	certo
Couro (3)	0,00	0,03	0,00	0,18	1,00	certo
Explosivo 2 (2)	0,00	0,03	0,63	0,33	0,00	<b>trocou</b>
Papel (2)	0,00	0,09	0,00	0,25	1,00	certo
Açúcar ((objeto composto 2 – RII 2)	0,00	0,29	0,00	0,00	1,00	certo
Explosivo 1 (3)	0,00	0,00	0,03	0,88	0,09	certo
Talco (3)	0,00	0,08	0,00	0,05	1,00	certo
Tecido (1)	0,00	0,07	0,19	0,21	0,53	certo
Batom (6)	0,00	0,06	0,00	0,08	1,00	certo
Droga 1 (2)	0,00	0,02	1,00	0,01	0,00	certo
Droga 2 (3)	0,00	0,22	1,00	0,09	0,00	certo
Droga 3 (objeto composto 2 – RII 3)	0,00	0,17	0,69	0,00	0,24	certo
Droga 4 (6)	0,00	0,00	0,85	0,34	0,00	certo
Droga 3 (2)	0,00	0,00	1,00	0,15	0,00	certo
Sal de frutas (1)	0,00	0,05	0,55	0,13	0,21	<b>Falso Positivo</b>
Explosivo 1 ((objeto composto2 – RII 1	0,00	0,05	0,00	0,82	0,64	certo
Couro ((objeto composto 2 – RII 4)	0,00	0,07	0,11	0,13	0,73	certo
Droga 3 oculta por ferro (2)	0,09	0,92	0,02	0,00	0,00	certo
Droga 3 oculta por café (2)	0,03	0,96	0,01	0,00	0,02	certo
Droga 3 oculta por chumbo (2)	0,54	0,47	0,00	0,00	0,13	certo
Droga 3 oculta por couro (2)	0,59	0,43	0,00	0,08	0,00	<b>trocou</b>
Droga 3 oculta por fumo (2)	0,54	0,43	0,00	0,00	0,05	<b>trocou</b>
Droga 3 oculta por madeira (2)	0,37	0,67	0,00	0,04	0,10	certo
Droga 3 oculta por tecido (2)	0,13	0,86	0,01	0,00	0,00	certo
Explosivo 1 oculto por alumínio (2)	0,65	0,35	0,00	0,00	0,08	certo
Explosivo 1 oculto por café (2)	0,69	0,30	0,00	0,02	0,08	certo
Explosivo 1 oculto por chumbo (2)	0,71	0,27	0,00	0,00	0,08	certo
Explosivo 1 oculto por couro (2)	0,00	1,00	0,02	0,00	0,01	<b>trocou</b>
Explosivo 1 oculto por ferro (2)	0,52	0,42	0,00	0,00	0,13	certo
Explosivo 1 oculto por fumo (2)	0,24	0,76	0,00	0,00	0,00	<b>trocou</b>
Explosivo 1 oculto por tecido (2)	0,66	0,37	0,00	0,01	0,11	certo

Tabela IV.8 – Predição com a RNA “o maior é o vencedor” para o conjunto de produção.

AMOSTRA (ENSAIO)	PREDIÇÃO RNA					IDENTIFICAÇÃO
	A	B	C	D	E	
Tecido (3)	0,00	0,00	0,20	0,10	0,62	certo
Açúcar (2)	0,00	0,00	0,00	0,16	0,88	certo
Droga 1 (3)	0,00	0,05	0,22	0,27	0,44	Falso Negativo
Droga 2 (2)	0,00	0,04	0,55	0,06	0,36	certo
Droga 3 (3)	0,00	0,01	0,78	0,12	0,11	certo
Droga 4 (3)	0,00	0,02	0,90	0,01	0,12	certo
Café (3)	0,00	0,04	0,07	0,19	0,78	certo
Droga 3 (objeto composto 3 – RII 3)	0,08	0,00	0,20	0,07	0,45	Falso Negativo
Açúcar (objeto composto 3 – RII 2)	0,00	0,02	0,29	0,00	0,72	certo
Cigarro (6)	0,00	0,02	0,38	0,47	0,04	Falso Positivo
Couro (2)	0,00	0,00	0,14	0,43	0,83	certo
Talco (2)	0,00	0,00	0,00	0,44	0,99	certo
Papel (3)	0,00	0,14	0,34	0,18	0,68	certo
Sal de frutas (2)	0,00	0,00	0,07	0,29	0,65	certo
Explosivo 2 (4)	0,00	0,00	0,03	0,88	0,09	certo
Explosivo 1 (2)	0,00	0,11	0,00	1,00	0,04	certo
Talco (7)	0,00	0,08	0,00	0,05	1,00	certo
Caneta (2)	0,00	0,00	0,00	0,42	0,80	certo
Batom (2)	0,00	0,07	0,00	0,19	1,00	certo
Droga 3 oculta por ferro (3)	0,11	0,90	0,01	0,01	0,00	certo
Droga 3 oculta por café (3)	0,02	0,97	0,00	0,00	0,04	certo
Droga 3 oculta por chumbo (3)	0,56	0,41	0,00	0,00	0,04	trocou
Droga 3 oculta por couro (3)	0,48	0,54	0,00	0,06	0,00	certo
Droga 3 oculta por fumo (3)	0,30	0,69	0,00	0,00	0,00	certo
Droga 3 oculta por madeira (3)	0,50	0,53	0,00	0,05	0,01	certo
Droga 3 oculta por tecido (3)	0,19	0,79	0,00	0,00	0,05	certo
Explosivo 1 oculto por alumínio (3)	0,79	0,21	0,00	0,00	0,09	certo
Explosivo 1 oculto por café (3)	0,71	0,31	0,00	0,03	0,07	certo
Explosivo 1 oculto por chumbo (3)	0,65	0,33	0,00	0,00	0,07	certo
Explosivo 1 oculto por couro (3)	0,14	0,98	0,00	0,00	0,72	trocou
Explosivo 1 oculto por ferro (3)	0,60	0,42	0,00	0,00	0,14	certo
Explosivo 1 oculto por fumo (3)	0,50	0,47	0,00	0,00	0,01	certo
Explosivo 1 oculto por tecido (3)	0,52	0,51	0,00	0,02	0,02	certo
Explosivo 1 oculto por madeira (3)	0,87	0,11	0,00	0,03	0,06	certo

Conforme observado nos resultados da predição da RNA “o maior é o vencedor”, a rede apresentou um índice de 92,21 % de acertos de classificação e 7,79 % de erros, sendo 1,95 % de falso positivo e 5,84 % de falso negativo.

Algumas considerações sobre as respostas da RNA “o maior é o vencedor” são:

- Na interpretação dos resultados, considerou-se como identificado o sub-grupo de materiais relacionados com a saída que apresentou como resposta o maior valor absoluto conforme descrito na seção III.2.3 (Figura III.26).
- Os oito casos em que a RNA identificou “droga oculta”, quando, na verdade, o material era “explosivo oculto” ou o inverso, foram considerados como acerto de classificação, porque a rede identificou como sendo material ilícito; esta situação foi prevista, na seção IV.2, durante a análise dos histogramas.
- Dois casos de objeto composto, em que a rede inverteu: 1) identificou “explosivo”, quando, na verdade, era amostra de droga; 2) identificou “droga”, quando se tratava de “explosivo”, foram considerados como acerto de classificação, porque também nesse caso a rede identificou como sendo material ilícito.
- Os registros de nove ocorrências do tipo “Falso Negativo” apontados pela RNA foram assim distribuídos: quatro, para a amostra “droga 1”; dois, para a amostra “explosivo 2”; um, para a amostra “droga 4”; um, para a amostra “droga 2”; um, para a “amostra 3”, no objeto composto. No caso da amostra “droga 1” ocorreu um erro sistemático, entretanto, para as demais amostras os erros foram aleatórios, associados ao processo estatístico da técnica.
- Três registros de ocorrências do tipo “Falso Positivo” foram apontados pela RNA: um, para a amostra de talco; um, para a amostra de sal de frutas; e outro para a amostra de cigarro. Não é possível se estabelecer uma correlação, pois não ocorreram erros sistemáticos aos quais se pudesse associar uma correspondência.
- Nesses casos, é necessário se estabelecer um critério para a classificação, podendo ser, por exemplo: se a diferença, em valor absoluto, entre os dois maiores resultados for de até 10 %, se interpretaria que a RNA não havia conseguido distinguir a classificação daquele material com grau de certeza.

A resposta da RNA, para os conjuntos de Treinamento, Teste e Produção, resultou numa boa convergência da rede sobre os conjuntos de perfis apresentados e, dessa forma confirmou o potencial de aplicação dessa técnica na classificação de materiais, a partir de imagens tomográficas de amostras que os contenha.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

O sistema tomográfico pode ser utilizado dispondo-se de fluxo de nêutrons térmicos relativamente baixo, tornando possível o uso de irradiadores de pequeno porte, cujas fontes isotópicas são de baixa à média atividade, o que implica na adoção de procedimentos de radioproteção pouco restritivos, o que não altera a rotina de funcionamento da instalação. Além disso, a aplicação de técnica de END, como a NRTR que permite a obtenção de imagens em tempo real, aliada ao algoritmo de reconstrução de imagem, baseado no conceito de entropia máxima (ARIEM) capaz de gerar imagem TC, a partir de poucas projeções, e ainda a automação das respostas através de RNA, capacitaram o sistema desenvolvido a realizar inspeções rápidas, em cerca de 1 minuto, e com um índice de acertos na identificação dos materiais acima de 90 %.

A alta probabilidade de atenuação dos nêutrons, por interações de espalhamento com os núcleos de hidrogênio, torna a inspeção de materiais hidrogenados uma das maiores potencialidades da utilização dos nêutrons térmicos em relação aos raios X, conforme mostra a figura II.1. Materiais explosivos plásticos ou líquidos, assim como alguns tipos de drogas, como a cocaína e seus derivados, ricos em hidrogênio, quando encapsulados por metais pesados, tais como, o aço e o chumbo, tornam a inspeção neutrongráfica indispensável. Como essa situação contempla grande parte das condições de ocultação usadas pelos traficantes e terroristas, para fugirem da inspeção por aparelhos de raios X, o sistema desenvolvido mostrou-se vantajoso [6], como se previa.

Os parâmetros relativos à caracterização do sistema de NRTR, isto é, resolução,  $UT$ , de cerca de  $U_T = 444 \mu m$  e sensibilidade  $\Delta x$ , de  $0,09 cm$ , para o *lucite*, assim como a análise visual dos Indicadores de Qualidade de Imagem (IRV e penetrâmetro) demonstraram que o sistema está apto a registrar imagens neutrongráficas de boa qualidade [30]. Essas características credenciam esse sistema a realizar inspeções de pequenos volumes de materiais ilícitos, mesmo quando ocultos por diversos outros, conforme mostraram as imagens tomográficas apresentadas nas figuras IV.5 a IV.14, que reconstruíram com fidelidade o corpo de prova original, com um nível de detalhamento

suficiente para se extrair comportamentos diferenciados que serviram para identificar e localizar pequenos volumes de materiais no interior do objeto inspecionado.

Quanto a identificação automática dos materiais ilícitos que compuseram as amostras analisadas, os índices de 97,40 % e 92,21% de acertos demonstraram a potencialidade da técnica de IA na solução desse tipo de problema. Com esses índices de acerto, o sistema desenvolvido apresentou qualificação compatível com sistemas descritos na literatura (vide tabela I.2). Além disso, a aplicação da técnica de IA mostrou-se eclética, no sentido de permitir a inclusão de outros tipos de materiais: drogas, explosivos ou ocultações, no treinamento das RNA, o que torna o sistema sempre apto às novas condições de inspeções. As respostas das RNA's podem ser analisadas em combinação com outras metodologias atualmente empregadas no combate ao terrorismo e narcotráfico. Por exemplo, nos casos em que a RNA não identifique claramente a classificação do material, pode-se adotar critérios variáveis, de forma a aumentar ou diminuir o intervalo de segurança em função na predição das RNA's, de acordo com a análise obtida no método de *perfilagem*.

Diante do exposto acima, pode-se concluir que o sistema desenvolvido para a detecção de drogas e explosivos, que foi testado com uso de amostras reais de drogas e explosivos, foi capaz de localizar e identificar, de forma automática a presença desses materiais em bagagens de mãos e postais, mesmo em condições diversas de ocultação, normalmente empregadas por terroristas e narcotraficantes. O sistema desenvolvido atende as características apontadas por especialistas para sistemas desta natureza, isto é, a inspeção de grande quantidade de amostras com relativa rapidez, sensibilidade, especificidade e decisão automatizada [6].

### ***Sugestões para trabalhos futuros***

Considerando as características dos END, em que há uma relação inversa entre o tempo necessário para se realizar uma inspeção e a precisão alcançada no resultado, sugere-se que alguns trabalhos sejam realizados a fim de se aperfeiçoar o sistema de detecção de drogas e explosivos, no que se refere a:

- 1) Implementar no ARIEM um aumento do número de intervalos, representados pelos níveis de cores, possibilitando uma análise mais detalhada do material inspecionado;
- 2) Realizar ensaios com Indicadores de Sensibilidade Neutronográfica para os materiais específicos, de forma a se verificar o limites de detecção do sistema para cada um deles, o que não foi possível de ser feito, por conta da pequena quantidade disponibilizada de materiais ilícitos.
  
- 3) Aplicações de novas RNA's, visando um aumento do índice de acertos, assim como, para novas amostras de drogas, explosivos e condições de ocultação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Resolução Nº. 7 da Agência Nacional de Aviação Civil (Anac), 28/02/2007.
- [2] ARBEX JR., J., “Narcotráfico – Um jogo de poder nas Américas” – 2ª Edição - Editora Moderna -2006.
- [3] COGGIOLA, O., “ O comércio de drogas hoje”, em: *Olho da História nº 4* – ([www.ufba.br/~revistao/04coggio.html](http://www.ufba.br/~revistao/04coggio.html)).
- [4] HAHN, R. W., “The Cost of Antiterrorist Rhetoric”. In: *CATO Regulation*, v.19, nº 4, Washington, USA – 1996.
- [5] SHEA, P., GOZANI, T., BOZORGMANESH, H., “ A TNA Explosives-Detection System in Airline baggage” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 299*, pp. 444-448, 1990.
- [6] GOZANI, T., “The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 213*, pp. 460-463, 2004.
- [7] HUSSEIN, E. M.A., LORD, P. M., BOT, D. L., “An Empirical Fast Neutron Technique for Detection of Explosive-like Materials”, *Nuclear Instruments and methods in Physics Research A 299*, pp. 453-457, 1990.
- [8] GOZANI, T., in:” *Proceedings of the International Conference on Neutrons in Research and Industry*”, SPIE The International Society of Optical Engineering, George Vourvopoulos (Ed.), pp. 174, Grécia, 1996.
- [9] GOZANI, T., in:” *Proceedings on Physics-Based Technologies for thr detection of Contraband*, SPIE, Lyle ° Malotky, John J. Pennella (Eds.), pp. 9, Boston, 1996.

- [10] NUNES, W. V., “*Detecção de Minas Terrestres por Radiação Penetrante*”. Tese de Doutorado – PEN / COPPE / UFRJ – 2006.
- [11] EBERHARDT, J. E., and otrs. “*Fast Neutron Radiography Scanners for the detection of Contraband in Air Cargo Containers*”. *Applied Radiation and Isotopes* 63, pp 179-188. 2005.
- [12] KENDEM, D., POLICHAR, R., ORPHAN, V., SHREVE, D., Neutron Radiography – Proceedings of the Second World Conference. D. Reidel publishing Company, John P. Barton, 439-446, Paris, 1986.
- [13] SINHA, A., BHAWE, B.D., PANCHAL, C.G., SHYAM, A., SRINIVASAN, M., JOSHI, V.M., “Exploratory Studies on Neutron Radiography With a Small Neutron Source Using a Nuclear Scintillation Imaging Technique”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Elsevier Science B.V, A 377, pp. 32-36 , 1996.
- [14] SILVA, A.X., *Uso de um Feixe de Nêutrons Térmicos para Detecção de Narcóticos e Explosivos por Tomografia, para Aplicação na Segurança Pública Nacional*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- [15] BRENIZER, J.S., BERGER, H., STEBBINGS, C.T., GILLIES, G.T., “Performance Characteristics of Scintillators For Use In an Electronic Neutron Imaging System For Neutron Radiography”, *Science Instrumentation*, American Institute of Physics. V. 68, n° 9, setembro, 1997.
- [16] SILVA, J. J. G., *Neutronografia com o Reator Argonauta do IEN*, Nota Técnica IEN-05, IEN-CNEN, Rio de Janeiro, 1974.
- [17] CRISPIM, V. R., *Desenvolvimento de Ensaio Não Destrutivos com Neutronografia*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.
- [18] HACIDUME, L. R., *Detecção de Explosivos Plásticos por Neutronografia Térmica*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.



- [19] FERREIRA, F. J. O., *Estudo para Implantação de um Sistema Eletônico para Aquisição de Imagens Neutronográficas no Reator Argonauta do IEN/CNEN*, tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, rio de Janeiro (2003).
- [20] BERGER, H, “Resolution Study of Photographic Thermal Nêutrons Image Detectors”, *Journal of Applied Physics*, V.34, n. 4, pp. 914-918, New York, 1963.
- [21] BERGER, H., ”Advances In Neutron Radiography”, *American Nuclear Society*, V. 53, n. 177. La Grange Park, 1986.
- [22] CASALI, F., CHIRCO, P., FESTINESI, A., GARAGNANI, A., PARTEMI, P., ROSA, R., “A System For Neutron Radiography With a Cooled CCD-Camera“ In: *Proceedings of Fourth World Conference Neutron Radiography – Proceedings*, D. Reidel Publishing Company, John P. Barton, pp. 481-486, San Diego, california, 1992.
- [23] LINDSAY, J. T., “*The MTF Method For Neutron Radioscopy Imaging System Characterization*” In: *Proceedings of Sixth World Conference on Neutron Radiography*, Osaka, 1999.
- [24] CASALI, F., CHIRCO, P., ZANARINI, M., “Advanced Imaging Techniques: a New Deal for Neutron Physics”, *La Revista Del Nuovo Cimento*, vol. 18, n° 10, Bologna, 1995.
- [25] SINHA, A., BHAWE, B.D., PANCHAL, C.G., SHYAM, A., SRINIVASAN, M., JOSHI, V.M., “Exploratory Studies on Neutron Radiography With a Small Neutron Source Using a Nuclear Scintillation Imaging Technique”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Elsevier Science B.V, A 377, pp. 32-36.
- [26] CRISPIM, V.R., SILVA, J.J.G, “Inspeções Não-Destrutivas com Neutronografia Térmica”, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, V. 11, n° 1, Março, 1996.

- [27] BRENIZER, J.S., BERGER, H., STEBBINGS, C.T., GILLIES, G.T., “Performance Characteristics of Scintillators For Use In an Electronic Neutron Imaging System For Neutron Radiography”, *Science Instrumentation*, American Institute of Physics. V. 68, n° 9, setembro, 1997.
- [28] SILVA, A.X., CRISPIM, V.R., HACIDUME L. R., “Neutronografia Aplicada no Combate ao Narcotráfico e ao Terrorismo”, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, V. 14, n. 1, Março, 1999 .
- [29] SILVA, X. A., CRISPIM, V.R., “Moderator-Collimator-Shielding Design for Neutron Radiography Systems Using  $^{252}\text{Cf}$ ”, *Applied Radiation and Isotopes* , V. 54, pp. 217-225, 2000.
- [30] MENEZES, M. O., *Radiografia com Nêutrons em Tempo-Real*, Tese de Doutorado, IPEN-CNEN/SP, USP, São Paulo, 2000.
- [31] KOERNER, S., LEHMANN, E., VONTOBEL, P., “Design and Optimization Of a CCD-Neutron Radiography Detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 454, pp. 158-164, 2000.
- [32] KOERNER, S., SCHILLINGER, B., VONTOBEL, P., RAUCH, H., “A Neutron Tomography Facility at a low Power Research Reactor”, *Nuclear Instruments and Methods in physics Research – A* 471, pp. 69 – 74, 2001.
- [33] KOBAYASHI, H., KOBAYASHI, I., SATOH, M., MORISHIMA, H., “Neutron Imaging Using An Optical Stimulated Luminescent Material  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}+\text{Gd}_2\text{O}_3$ ”, In: *Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography*, pp. 131, Roma, 2002.
- [34] POPOV, A. L., MYLES, D. A. A., DAUVERGNE, F., WILKINSON, C., “Development Of Storage Phosphors And Image Plates For Neutron Imaging”, In: *Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography*, pp. 132, Roma, 2002.

- [35] MOCHIKI, K., IKEDO, Y., MURATA, Y., NITTOH, K., KONAGAI, C., “Color Radiography”, In: *Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography*, pp. 179, Roma, 2002.
- [36] ASANO, H., TAKENADA, N. FUJII, T., NAKAMATSU, E., TAGAMI, Y., TAKESHIMA, K., “Image Processing Methods to Obtain Cross Sectional Void Fraction Distribution Of Gas-Liquid Two-Phase Flow a Projection Image By Thermal Neutron Radiography”, In: *Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography*, pp. 109, Roma, 2002.
- [37] KATO, K., IKEDA, Y., “Influences Of Scattered Neutrons And Gamma Ray On Neutron Radiography Using Imaging Plate For Neutron Detector” In: Abstracts of Seventh World Conference on Neutron Radiography, pp. 110, Roma, 2002.
- [38] RICHARDS, W. J., GIBBONS, M.R., SHIELDS, K.C., “*Neutron Tomography Developments and Applications*”. Applied Radiation and Isotopes 61, pp. 551-559, 2004.
- [39] EBERHARDT, J. E. and all, “*Fast Neutron Radiography scanner for the detection of contraband in air cargo containers*”. Applied Radiation and Isotopes 63, pp 179-188, 2005.
- [40] WANG, H. and all, “*Study of Artificial Neural Network on Explosive Detection with PFTNA Method*”, In: Abstracts of the Nuclear Science Symposium Conference Record - IEEE, vol. 1, pp. 471-473, Puerto Rico, 2005.
- [41] DUDERSTADT, J.J. and HAMILTON, L.J., *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley and Sons, 1976.
- [42] LAMARSH, J. R., *Introduction to Nuclear Reactor Theory* . Addison-Wesley Publishing Company, 1978.
- [43] DOMANUS, J. C., *Practical Neutron Radiography*, Commission of the European Communities, Kluwer Academic Publishers, 1 ed., 1992.

- [44] Wikipedia “<http://de.wikipedia.org/wiki/C4>”,  
“<http://de.wikipedia.org/wiki/SEMTEX>.”
- [45] SILVA, J. J. G., Neutronografia com o Reator Argonauta do IEN, Nota Técnica IEN-05, Rio de Janeiro, 1974.
- [46] REILLY, D., ENSSLH, N., SMITH, H., “ *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*”, Los Alamos National Laboratory, Washington (1991).
- [47] GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E., *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc. Second Edition, 2002.
- [48] GONÇALVES, M. J., *Otimização de um Detector Gasoso Sensível à Posição para Utilização em Sistema Tomográfico com Nêutrons Térmicos*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Ja
- [49] BUSHBERG, J.T., SEIBERT, J. A., LEIDHOLDT, E. M., BOONE, J.M., *The Essential Physics of Medical Imaging*, Lippincott Williams & Wilkins, 2<sup>a</sup> edição, 2001.
- [50] KAK, A.C., SLANEY, M., *Principles of Computerized Tomography Imaging*, IEE, New York, 1988.
- [51] HERMAN, G.T., *Image Reconstruction from Projections*, In: *The Fundamental of Computerized Tomography*, Academic Press, new York, 1980.
- [52] REIS, M. L., “*Base Natural e Entropia em Problemas de Reconstrução de Imagens*”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- [53] PAPOULIS, A., “*Probability, Randon Variables and Stochastic*”, Process 2<sup>a</sup> edition, Mac Graw Hill, New York, 1994.
- [54] HAYKIN, S., *Neural Networks: a comprehensive Foundation*, 2<sup>a</sup> edition, New Jersey, Prentice Hall, 1999.

- [55] RUMELHART, D. E., HINTON, G. E. and WILLIAMS, R. J. *"Learning internal representations by error propagation"*, MIT Press Computational Models of Cognition and Perception Series, vol. 1, p. 318-362, 1986.
- [56] HORNIK, K., STINCHCOMBE, M. and WHITE, H. (1989) *"Multilayer feedforward networks are universal approximators"*, Neural Network, vol. 2 (5), p. 359-366, 1989.
- [57] KLIMASAUKAS, C.C., *Applying neural networks, Part 3: Training a neural network*, In: Proceedings in Artificial Intelligence, pp. 20-24, 1991.
- [58] ASTM E 1441-95, *Non-Destructive Testing Radiation Methods*. Guide for Imaging and Practice for examination. ISSO/TC 135/SC 5, N 118, USA, 1996.
- [59] VOI, D.L., *Estudo da Estabilidade e Dinâmica Moleculares da Baquelite Através de Medidas de Seção de Choque para Nêutrons*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- [60] RENKE, C.A.C., *Estudo da Moderação de Nêutrons na Direção do Canal J-9 do Reator Argonauta*, Nota Técnica, IEN/CNEN, Rio de Janeiro, 1993.
- [61] FERREIRA, F.J.O., SILVA.A.X., CRISPIM,V.R. *"Implantação de um Sistema Eletrônico para Aquisição de Imagens Neutronográficas em Tempo real no Reator "Argonauta do IEN/CNEN"*, Revista Brasileira de P&D, vol. 6, n<sup>o</sup> 1 – 2004.
- [62] ASTM e 1025-84. *Standard Practive for Hole-Type Image Quality Indicator Used for Radiography*, U.S.A, 1981.
- [63] ASTM e 545-91. *Standart Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiography Examination*, pp.511-516, USA, 1991.
- [64] SILVANI, M. I. *"Tomografia Computadorizada com Nêutrons Térmicos e Detector Sensível a Posição"*. Tese de Doutorado, PEN – COPPE – UFRJ – 2001.