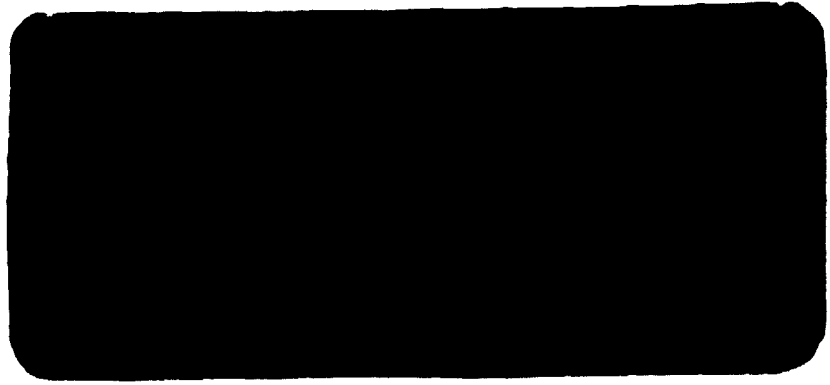
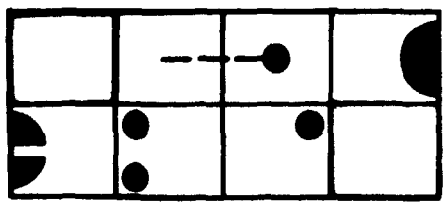


L

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA



**IMPLANTAÇÃO DE UMA SISTEMÁTICA PARA  
CONTROLE DA QUALIDADE DE SERVIÇOS  
DE DOSIMETRIA INDIVIDUAL**

**Autor: José Otávio Andrade Franco  
Orientador: Maurício Mendes Campos**

---

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**IMPLANTAÇÃO DE UMA SISTEMÁTICA PARA  
CONTROLE DA QUALIDADE DE SERVIÇOS  
DE DOSIMETRIA INDIVIDUAL**

**Autor: José Otávio Andrade Franco  
Orientador: Maurício Mendes Campos**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências  
e Técnicas Nucleares da UFMG, como parte dos requisitos ne  
cessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências.**

**Belo Horizonte - Brasil  
Julho/1984**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** *Implantação de uma Sistemática para Controle da Qualidade de Serviços de Dosimetria Individual.*

**NOME DO AUTOR** : *Engº Eletrônico José Otávio Andrade Franco*

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora, constituída dos Senhores:

*Delmiro Schmidt de Andrade, Dr.*

*Roberto Paulo Câmara Salvi, M.Sc.*

**Orientador:** *Maurício Mendes Campos*  
*Maurício Mendes Campos, Engº Nuclear*

Belo Horizonte, 16 de abril de 1985  
(Data defesa dissertação)

Este trabalho foi realizado nas instalações do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - NUCLEBRÁS, e constitui uma tarefa do programa de atividades do Departamento de Radioproteção e Apoio ao Licenciamento.

**Dedico este trabalho a  
Veramaria e a Sílvia.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Eng<sup>o</sup> Maurício Mendes Campos, meu orientador, pela contri  
buição, estímulo e compreensão.

Aos Srs. Virgílio Mattos de Andrade e Silva, José Olympio Nar  
delli Monteiro de Castro e Márcio Tadeu Pereira, por haverem  
permitido a realização deste trabalho.

Aos colegas: Antonio de Pádua Nasrala, Elton Gomes Pereira ,  
Hudson Rúbio Ferreira, Luiz Oliveira de Faria, Solange Ceret  
ta Nunes, Tetsuaki Wakabayaski e Tomie Hirayama, pelo estímu  
lo e sugestões.

Aos técnicos: Carlos Manoel de Assis Soares, Marília Tavares  
Christovão, Pedro Eustáquio Gonçalves e Thessa Cristina Alon  
so pela colaboração na parte experimental.

À Seção de Documentação Técnica do Centro de Desenvolvimento  
da Tecnologia Nuclear (CDTN) pelo pronto atendimento às mi  
nhas solicitações bibliográficas.

À Divisão de Formação e Treinamento pelo apoio prestado.

À secretária Rosária Maria Macêdo pela datilografia do texto.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram,

meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O trabalho propõe uma sistemática de controle da qualidade, aplicável a serviços de dosimetria individual. A implantação desta sistemática de controle aos serviços dosimétricos prestados pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN visa a obtenção de resultados de dose confiáveis, que atendam especificamente a requisitos pré-estabelecidos de precisão e exatidão.

Com as devidas adaptações, foram implantadas técnicas estatísticas de controle da qualidade, correntemente utilizadas na indústria: os "Gráficos de Controle" para o controle do processo de medição e a "Inspeção por Amostragem" para o controle dos resultados produzidos em rotina.

Os resultados experimentais obtidos demonstram a viabilidade e as vantagens de introdução da sistemática de controle proposta.

Com o objetivo de tornar mais compreensível a apresentação do assunto, incluiu-se o capítulo "Radioproteção e Dosimetria Individual", que revê conceitos relacionados à dosimetria e descreve técnicas utilizadas na medição de doses individuais de radiação externa.



**ABSTRACT**

A quality control systematics for personnel monitoring services is proposed. The implementation of this control systematics to the dosimetric services provided by the Nuclear Technology Development Center - CDTN aims at obtaining reliable dose results, in compliance with established requirements of precision and accuracy.

Statistical quality control techniques used commonly in industrial practice were implemented with due adaptations: "control charts" for control of the measuring process, and "sampling inspection" for control of dose results produced in routine.

The experimental data obtained evidence the feasibility and advantages of introducing the control systematics proposed.

In order to provide better insight to the presentation of the subject, a chapter on Radiation Protection and Personnel Monitoring was included.

## SUMÁRIO

	Pág.	
1.	INTRODUÇÃO .....	5
1.1	Garantia da Qualidade - Conceitos Gerais ..	5
1.2	Garantia da Qualidade Aplicada a Serviços de Dosimetria Individual .....	8
1.3	O Serviço de Dosimetria Individual do CDTN.	9
1.4	Escopo deste Trabalho .....	10
2.	RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA INDIVIDUAL .....	13
2.1	Radioproteção .....	13
2.2	Grandezas Dosimétricas .....	15
2.3	Disposições Normativas .....	25
2.4	Dispositivos Utilizados para Medição de Do ses Individuais .....	27
2.5	Procedimentos de Dosimetria Individual Uti lizados no CDTN .....	35
2.6	Especificações quanto aos Resultados de Do se .....	42
3.	DESCRIÇÃO DA SISTEMÁTICA DE CONTROLE PROPOS TA.....	46
3.1	Introdução .....	46
3.2	Gráficos de Controle .....	47
3.3	Inspeção por Amostragem .....	53
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	59
4.1	Dispositivos Utilizados .....	59
1.2	Gráficos de Controle .....	62
4.3	Inspeção por Amostragem .....	81

5.	CONCLUSÕES .....	102
	APÊNDICE I - Tabelas para Cálculo dos Limi <u>tes</u> de Controle .....	104
	APÊNDICE II- Formulário para Coleta de Da <u>dos</u> .....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109
	BIBLIOGRAFIA ADICIONAL .....	111

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Garantia da Qualidade - Conceitos Gerais

Quando um fabricante produz um determinado artigo (cimento , reagentes químicos, transistores, geladeira, etc.), ele presu põe obviamente que indivíduos ou empresas irão fazer uso de seu produto. Na realidade, a aquisição de um determinado artigo por um consumidor está condicionada a um grande número de fatores, que incluem o preço do artigo, disponibilidade para entrega, facilidade de manutenção (no caso de aparelhos e equipamentos) e ainda a certas características do artigo que, em conjunto, determinam a "qualidade do produto".

Conceitualmente, o termo qualidade de um produto refere-se , em geral, ao grau com que o produto satisfaz, quando em uso, as necessidades ou exigências do consumidor. Assim, um eletrodoméstico será de boa ou má qualidade, conforme seu desempenho corresponda ou não à expectativa dos consumidores; um tipo de cimento será de boa ou má qualidade, dependendo se ele atende ou não aos propósitos de sua fabricação.

Este conceito de qualidade de um produto, vinculado a uma a valiação subjetiva de desempenho do produto pelos consumidores, não é, em geral, adequado para harmonizar os interesses de fabricantes e consumidores. Assim, com o advento da indústria moderna, onde o fabricante de um determinado item é em geral consumidor de itens produzidos por outros fabricantes, sentiu-se a necessidade de se expressar a qualidade de um produto em bases mais objetivas, na maioria dos casos em termos quantitativos. Para este fim, foram introduzidas as chamadas "especificações da qualidade", isto é, uma relação escrita que discrimina as principais características que determinam a qualidade do produto (dimensões, propriedades físicas e

químicas, fração defeituosa etc.).

Como ilustração, apresenta-se abaixo uma parte das especificações referentes a um concentrado de urânio:

Urânio (U)	-	≥	65%
Fósforo ( $PO_4^{3-}$ )	-	≤	1,00%
Enxofre ( $SO_4^{2-}$ )	-	≤	12,00%
Ferro (Fe)	-	≤	1,00%
Sódio (Na)	-	≤	7,50%
Boro (B)	-	≤	0,10%

As especificações vêm prover, portanto, uma base objetiva não só para expressar a qualidade de um produto, mas também para controlar e comprovar o nível da qualidade especificado.

Uma vez identificado o nível da qualidade desejado pelo consumidor, traduzido em termos de especificações, a primeira preocupação do fabricante é fazer com que a qualidade de seu produto atinja o nível desejado. Esta é uma tarefa que envolve geralmente trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, elaboração de especificações de projeto, treinamento e qualificação de pessoal, elaboração de procedimentos operacionais, teste de protótipos do produto etc.

O fabricante deverá em seguida estabelecer e implementar procedimentos de controle para assegurar que o processo de fabricação será capaz de manter o nível da qualidade desejado. Além disso, é muitas vezes necessário, seja para atender exigências legais, seja para atender exigências do consumidor, que o fabricante apresente evidências objetivas de que ele tomou todas as providências cabíveis para assegurar que seu produto atenderá às especificações.

É neste contexto que se definem:

. Garantia da Qualidade:

Conjunto de todas as medidas, planejadas e sistemáticas, que são necessárias para assegurar que um produto ou serviço a tenderá ao nível da qualidade desejado;

. Controle da Qualidade:

Parte da garantia da qualidade que compreende as medidas particularmente relacionadas à medição e controle das características físicas de materiais, equipamentos, processos etc., com o objetivo de manter as características da qualidade do produto ou serviço dentro de especificações pré-estabelecidas.

As medidas de garantia da qualidade de uma organização são em geral consolidadas num documento, que constitui o seu Programa de Garantia da Qualidade. Tal documento inclui normalmente os seguintes tópicos:

- 1) Estrutura Organizacional - Atribuições e Responsabilidades
- 2) Especificação das Qualificações de Pessoal
- 3) Procedimentos Operacionais e Instruções
- 4) Registros
- 5) Controle da Qualidade
- 6) Auditorias

Convém assinalar que, no contexto da garantia da qualidade, o termo auditoria se refere às atividades desempenhadas para verificar a efetiva implementação das medidas previstas no programa de garantia da qualidade, bem como para verificar a

adequação de tais medidas.

## 1.2 Garantia da Qualidade Aplicada a Serviços de Dosimetria Individual

Ao se efetuar uma análise química, um ensaio físico ou uma medição de qualquer outro tipo, pressupõe-se que o resultado irá servir de subsídios para uma ação subsequente. Assim, ao se medir a área de uma sala, a ação subsequente poderia ser a encomenda de uma certa quantidade de material de revestimento para o piso da sala; ao se medir o nível de radiação num determinado local de trabalho, a ação poderia ser a interdição da permanência de pessoas no local.

Percebe-se que a ação tomada com base no resultado de uma medição pode ter, em alguns casos, uma consequência apenas trivial, enquanto que em outros, ela poderá ter importantes repercussões, seja de caráter econômico, científico ou de segurança. Assim, dependendo da finalidade da medição em questão, é necessário que se adotem medidas, mais ou menos rigorosas, para assegurar que os resultados a serem obtidos atendam realmente a seu objetivo, qual seja, o de propiciar ações ou decisões suficientemente corretas.

Fazendo um paralelo entre o uso de artigos produzidos por um fabricante e o uso de resultados de medição produzidos por um laboratório, reconhece-se facilmente a necessidade ou conveniência de que laboratórios, que operem em rotina, implementem medidas de garantia da qualidade, ou seja, medidas planejadas e sistemáticas que são necessárias para assegurar a adequada credibilidade ou validade dos resultados a serem emitidos.

No caso particular da dosimetria individual, assunto que será tratado com detalhes no Capítulo 2, a grandeza de interesse é a dose de radiação recebida por um indivíduo, durante

um certo período de trabalho ou de permanência eventual, em local onde existem fontes de radiação. Em face dos riscos potenciais da exposição do homem às radiações, as ações tomadas com base nos resultados de medição de dose estão diretamente relacionadas com a segurança dos indivíduos expostos à radiação.

No Brasil, o órgão competente para estabelecer normas de segurança relativas à proteção radiológica de trabalhadores e outras categorias de pessoas é a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Reconhecendo a importância das ações tomadas com base nos resultados de dose individual, a CNEN aprovou, em outubro de 1981, a Norma CNEN-NE-3.04<sup>1</sup>, que estabelece os requisitos e as condições necessárias para que a CNEN autorize o funcionamento de laboratórios que prestam serviços de dosimetria individual. Esta Norma exige, basicamente, que o laboratório implemente um programa de garantia da qualidade, incluindo especificamente um programa de controle da qualidade.

### 1.3 O Serviço de Dosimetria Individual do CDTN

O atual serviço de dosimetria individual do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear teve sua origem no antigo Laboratório de Dosimetria Fotográfica do Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), implantado em 1962, com assistência técnica do "Commissariat à l'Energie Atomique" da França.

Este laboratório de dosimetria, um dos pioneiros no Brasil, atendeu inicialmente às necessidades de controle dosimétrico do pessoal do IPR, no âmbito de seus programas de pesquisa e desenvolvimento no campo da energia nuclear. Com o correr dos anos, o serviço de dosimetria individual do IPR passou a atender um número cada vez maior de usuários, incluindo pessoal de indústrias, universidades, hospitais e clínicas médi

---

<sup>1</sup>Norma CNEN-NE-3.04 - Autorização para o Funcionamento dos Laboratórios de Serviços de Monitoração Individual.



cas e odontológicas, instituições estas carentes da infra-estrutura técnica necessária para efetuar o controle dosimétrico de seu pessoal.

Em 1977, o IPR foi transformado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS, sendo atribuída ao Centro, a partir de 1980, a tarefa de efetuar o controle dosimétrico de todo o pessoal, da NUCLEBRÁS e Subsidiárias, sujeito a trabalhos com radiação.

Para ilustrar o crescimento da demanda dos serviços de dosimetria prestados pelo CDTN, a Figura 1.1 mostra a evolução do número de usuários controlados ao longo dos últimos 17 anos (1967 a 1983).

Em face do considerável aumento de usuários e de entidades controladas, o CDTN introduziu a partir de 1981 uma sistemática de processamento de dados por computador, que contribuiu significativamente para agilizar todos os registros pertinentes ao serviço de dosimetria individual. O CDTN vem ainda participando, nos últimos anos, dos programas de comparação interlaboratorial de resultados de dose, promovidos pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria da CNEN.

Atendendo a requisitos da Resolução CNEN-12/81<sup>1</sup>, o CDTN apresentou à CNEN, em maio de 1982, o documento "Serviço de Monitoração Individual Externa por Filmes Dosimétricos do CDTN/NUCLEBRÁS", que estabelece as bases do Programa de Garantia da Qualidade dos serviços de dosimetria individual do CDTN.

#### 1.4 Escopo deste Trabalho

A idéia de se implementarem medidas visando o aprimoramento dos serviços de dosimetria individual do CDTN não foi, a rigor, motivada pela necessidade de atendimento a exigências da

---

<sup>1</sup>Resolução CNEN-12/81 - Autorização para o Funcionamento dos Laboratórios de Serviços de Monitoração Individual.

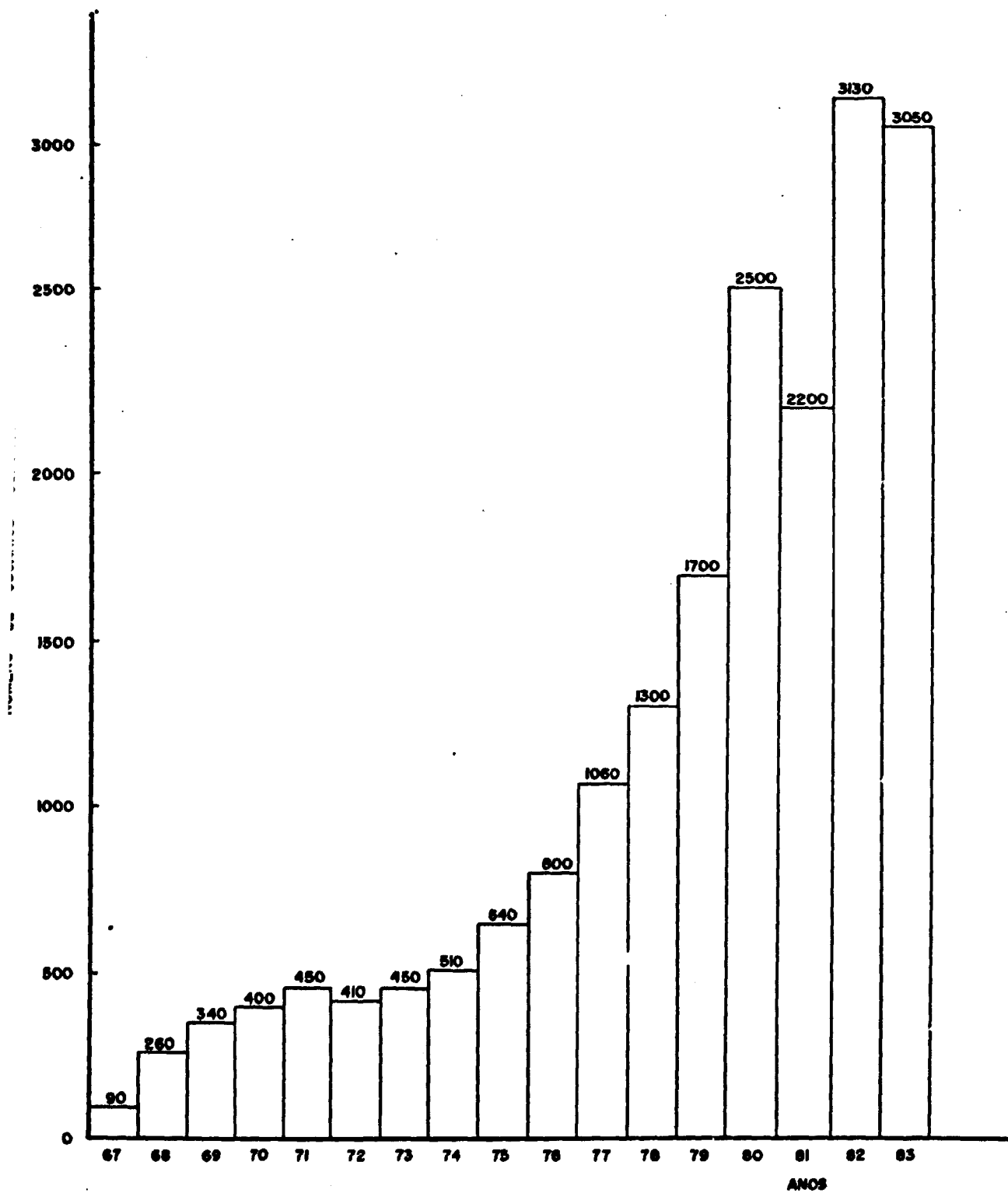


FIG. 1.1 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE USUÁRIOS CONTROLADOS PELO CDTN

CNEN. Ela resultou, na realidade, da política adotada pela direção do Centro, no sentido de conferir a todos os serviços prestados pelo CDTN, os padrões de qualidade condizentes com as necessidades dos usuários, sejam eles órgãos da NUCLEBRÁS ou instituições externas.

Em vista da experiência adquirida na implantação do sistema de garantia da qualidade de análises químicas do CDTN, procurou-se aplicar, aos serviços de dosimetria individual, técnicas de controle da qualidade similares às que foram implantadas para controle dos serviços analíticos. Em particular, procurou-se adaptar para a dosimetria individual, as técnicas estatísticas dos "gráficos de controle" e da "inspeção por amostragem", visando, respectivamente, o controle sistemático do processo de medição e dos resultados obtidos em rotina.

É objetivo básico deste trabalho descrever a sistemática de controle implantada e apresentar os resultados obtidos na aplicação das técnicas de controle utilizadas.

Para uma melhor compreensão do assunto objeto deste trabalho, foi introduzido um capítulo que apresenta conceitos relacionados à dosimetria individual e descreve técnicas e dispositivos utilizados na medição de doses de radiação externa.

## 2. RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA INDIVIDUAL

### 2.1 Radioproteção

O homem e os demais seres vivos têm sido permanentemente expostos a radiações naturais, em consequência da radiação cósmica, de origem extraterrena, e dos materiais radioativos dispersos no ambiente e mesmo no interior do organismo. As chamadas radiações ionizantes só foram porém reconhecidas e caracterizadas a partir do final do século passado, após a descoberta dos raios X por Roentgen em 1895 e da radioativada de natural por Becquerel em 1896.

A estas descobertas, seguiram-se rapidamente aplicações práticas de aparelhos de raios X e de fontes radioativas, principalmente em medicina e na pesquisa científica. No trabalho com fontes de radiação, cientistas e médicos reconheceram, desde logo, os efeitos nocivos das radiações para o homem. O primeiro câncer no homem, provocado pelas radiações, foi assinalado em 1902 e, em 1910, Pierre Curie forneceu a primeira prova experimental do efeito cancerígeno da radiação [01].

Apesar da evidência de um grande número de lesões, e mesmo de mortes, causadas por excesso de exposição, poucas foram as medas efetivas adotadas para proteger o homem contra as radiações, nestes primórdios da radiologia médica e de outras aplicações das fontes de radiação.

Um marco dos mais significativos para o estabelecimento de normas de segurança radiológica foi a criação, em 1928, do "International Committee on X-Ray and Radium Protection" que, congregando especialistas de vários países, passou a publicar periodicamente relatórios abrangentes sobre o assunto e recomendações baseadas nos dados experimentais disponíveis. Este comitê foi reestruturado em 1950, passando a se denominar

"International Commission on Radiological Protection" - ICRP. Suas recomendações constituem a base das normas de Radioproteção de quase todos os países.

Os efeitos maléficos das radiações, a altos níveis de dose<sup>1</sup>, são hoje nitidamente comprovados. A evidência de tais efeitos no homem provém dos estudos dos sobreviventes das bombas de Hiroxima e Nagasaki, de pacientes de radioterapia e de um pequeno número de trabalhadores que foram eventualmente expostos a altos níveis de radiação. Alguns desses efeitos, subsequentes à exposição a doses elevadas, se manifestam a curto prazo: são os efeitos agudos, que incluem queimaduras da pele, perda de cabelos, náuseas, alterações sanguíneas etc. Para estes efeitos, admite-se em geral que sua gravidade aumenta com o valor da dose recebida e que existe um limiar de dose, abaixo do qual o efeito não se torna aparente.

Ao contrário, a ocorrência de certos efeitos tardios como a leucemia e outros tipos de câncer tem um caráter aleatório: eles se manifestam apenas sobre uma fração dos indivíduos irradiados e a gravidade do efeito é totalmente independente da dose. Embora se possa afirmar que existe uma relação direta entre a frequência de aparição destes efeitos aleatórios e a dose recebida, é impossível precisar, à luz dos conhecimentos atuais, qual é a forma desta relação e se existe ou não um limiar de dose abaixo do qual a frequência de aparição de tais efeitos não seja, estatisticamente, significativa. Para os propósitos da Radioproteção, em que é obviamente admissível errar a favor da segurança, as recomendações da ICRP se baseiam na hipótese conservativa de que esta relação é linear e sem limiar de dose [02].

Considerando o objetivo da Radioproteção de prevenir a ocorrência dos efeitos não aleatórios e de limitar a probabilidade de ocorrência dos efeitos aleatórios a níveis julgados aceitáveis, os princípios básicos de proteção radiológica podem ser assim formulados:

---

<sup>1</sup>O conceito de dose de radiação é introduzido na Seção 2.2.

(i) qualquer prática operacional, envolvendo exposição de indivíduos à radiação, só deve ser adotada, se da mesma resultar um benefício líquido;

(ii) todas as exposições justificadas devem ser mantidas a níveis de dose tão baixos quanto razoavelmente exeqüível, levando-se em consideração fatores sociais e econômicos;

(iii) as doses recebidas por indivíduos não devem exceder os limites estipulados em normas, para as circunstâncias específicas de cada situação.

Do ponto de vista operacional, a aplicação destes princípios de Radioproteção, no âmbito de uma entidade onde se trabalha com fontes de radiação, requer o estabelecimento e implementação de um "Programa de Proteção Radiológica", que prescreva, em particular, os procedimentos técnicos e administrativos para controle e avaliação das doses recebidas por trabalhadores e outras categorias de pessoas.

## 2.2 Grandezas Dosimétricas

### 2.2.1 Introdução

A dosimetria tem como objetivo geral a caracterização quantitativa dos fenômenos de irradiação da matéria, ou seja, a quantificação dos efeitos das radiações sobre os materiais irradiados e, particularmente no caso da dosimetria aplicada à Radioproteção, a quantificação dos efeitos das radiações sobre o tecido biológico.

A interação das radiações ionizantes com a matéria, qualquer que ela seja, é basicamente um processo de transferência de energia, primariamente associado aos mecanismos físicos de ex

citação e ionização de átomos ou moléculas do material irradiado. No caso da irradiação de organismos vivos, estes mecanismos primários de interação dão origem a uma complexa cadeia de reações químicas, biológicas e fisiológicas, cujo efeito macroscópico só se manifesta, em muitos casos, depois de vários anos.

A cada reação provocada no organismo, se poderia, em princípio, associar um conceito de dose. Todavia, os efeitos químicos, biológicos e fisiológicos das radiações não podem ser definidos e medidos com exatidão. Ao contrário, os efeitos físicos primários de absorção de energia e de ionização são passíveis de uma definição exata, não dependem do órgão irradiado e são em princípio mensuráveis. Cabe, no entanto, observar que um conceito físico de dose só poderá ser utilizado como medida da periculosidade de uma determinada irradiação, se for possível estabelecer uma relação entre os efeitos físicos primários e os efeitos radiobiológicos que aparecem no organismo.

Uma medição direta da absorção de energia ou da ionização no interior do organismo não é praticamente viável. Nestas condições, torna-se necessário estabelecer procedimentos básicos de medição que propiciem resultados equivalentes aos que seriam obtidos no organismo e que, além disso, sejam independentes da direção e energia da radiação incidente (requisitos dosimétricos de equivalência ao tecido e de independência da energia).

Em Radioproteção, são correntemente utilizados três conceitos de grandezas dosimétricas:

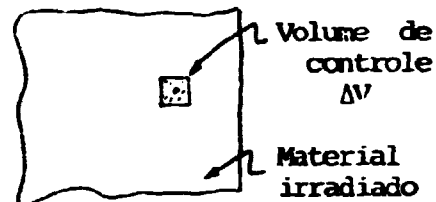
- . a dose absorvida (D)
- . a exposição (X)
- . a dose equivalente (H).

### 2.2.2 Dose absorvida

Esta grandeza dosimétrica é definida para todos os tipos de radiação ionizante e para qualquer espécie de material irradiado.

Considere-se um material qualquer, exposto a radiações ionizantes emitidas por fontes externas ou internas a ele. Seja  $\Delta V$  um volume de controle em torno do ponto de interesse no material irradiado.

Ao longo da irradiação, partículas ionizantes, primárias ou secundárias, transitarão pelo elemento de volume  $\Delta V$ , interagindo eventualmente com o material nele contido (excitação, ionização, reações nucleares). Considerando todas as partículas ionizantes que penetram em  $\Delta V$  e saem de  $\Delta V$ , durante a irradiação, a energia  $\Delta \epsilon$  transferida ao material de massa  $\Delta m$ , contido em  $\Delta V$ , pode ser calculada através do seguinte balanço:



$$\Delta \epsilon = \sum E_{in} - \sum E_{ex} + \sum Q$$

onde:

$\sum E_{in}$  = soma das energias (excluídas as de repouso) de todas as partículas ionizantes que penetram em  $\Delta V$ ;

$\sum E_{ex}$  = soma das energias (excluídas as de repouso) de todas as partículas ionizantes que saem de  $\Delta V$ ;

$\sum Q$  = soma do balanço de energias liberadas menos energias consumidas em todas as transformações de núcleos e partículas elementares que ocorrem em  $\Delta V$ .

Nestas condições, a dose absorvida  $D^1$ , no ponto de interesse do material, é definida pela relação:

---

<sup>1</sup>Definições rigorosas de dose absorvida e de outras grandezas dosimétricas podem ser encontradas na referência [03].



$$D = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta m}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a dose absorvida é expressa em joule por quilograma ( $\text{J.kg}^{-1}$ ), unidade esta que recebeu o nome especial de gray (Gy). Utiliza-se ainda a unidade especial rad, assim definida:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J.kg}^{-1} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

Define-se a taxa de dose absorvida  $\dot{D}$  pela razão:

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t}$$

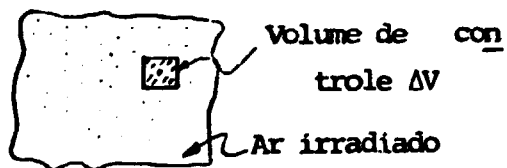
onde  $\Delta t$  é um intervalo de tempo elementar e  $\Delta D$  a dose absorvida durante este intervalo de tempo. Sua unidade no SI é o gray por segundo [ $\text{Gy.s}^{-1}$ ].

### 2.2.3 Exposição

A grandeza exposição se refere exclusivamente à irradiação do ar por fótons de radiação X ou gama.

Considere-se uma certa porção de ar, exposta a radiação X ou gama. Seja  $\Delta V$  um volume de controle em torno do ponto de interesse do ar irradiado.

A interação de fótons com o ar contido em  $\Delta V$  vai provocar, ao longo da irradiação,



a liberação de elétrons secundários (incluindo pósitrons).

Tais elétrons secundários, gerados em  $\Delta V$ , produzirão, até seu freamento completo no ar, um certo número de pares de íons no ar (incluindo pares de íons formados no exterior de  $\Delta V$ ). Sendo  $\Delta Q$  a carga total, de um único sinal, dos íons produzidos, e  $\Delta m$  a massa do ar contido em  $\Delta V$ , define-se a exposição  $X$ , no

ponto de interesse, através da relação:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

A unidade de exposição no SI é o coulomb por quilograma ( $C.kg^{-1}$ ). A unidade especial roentgen (R), de uso ainda frequente, é assim definida:

$$1 R = 2,58 \times 10^{-4} C.kg^{-1}$$

A taxa de exposição  $\dot{X}$  é definida pela razão:

$$\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

onde  $\Delta t$  é um intervalo de tempo elementar e  $\Delta X$  a exposição durante este intervalo. Sua unidade no SI é o coulomb por quilograma-segundo ( $C.kg^{-1}.s^{-1}$ ).

#### 2.2.4 Relação entre exposição e dose absorvida

A interação de fótons com a matéria dá origem a elétrons secundários que, por sua vez, transferem sua energia ao material irradiado, através dos processos de excitação e ionização. Se o material irradiado for o ar atmosférico, a grandeza exposição considera a ionização produzida no ar pelos elétrons secundários liberados em  $\Delta V$ , enquanto que a dose absorvida considera a energia transferida por elétrons secundários ao ar contido em  $\Delta V$ . Nas chamadas condições de "equilíbrio eletrônico", as ionizações produzidas no exterior de  $\Delta V$ , pelos elétrons gerados em  $\Delta V$ , são compensadas por ionizações produzidas em  $\Delta V$  por elétrons gerados fora de  $\Delta V$ . Nestas condições, a relação entre a exposição e a dose absorvida no ar pode ser facilmente calculada.

Sejam:

$\Delta n$  = número total de pares de íons produzidos em  $\Delta V$  =  
 = número total de pares de íons produzidos pelos elétrons  
 liberados em  $\Delta V$ ;

$\Delta m$  = massa do ar contido em  $\Delta V$ ;

$W_{ar}$  = energia dispendida em média por um elétron, para cada par  
 de íons que aparece no ar;

$e$  = carga elementar de um íon.

A energia  $\Delta \epsilon$  transferida ao ar contido em  $\Delta V$  pelos elétrons  
 secundários será:

$$\Delta \epsilon = W_{ar} \cdot \Delta n$$

A carga total, de um mesmo sinal, desses íons será:

$$\Delta Q = e \cdot \Delta n$$

Assim: 
$$\Delta \epsilon = W_{ar} \cdot \frac{\Delta Q}{e}$$

$$\frac{\Delta \epsilon}{\Delta m} = \frac{W_{ar}}{e} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Ou seja: 
$$D_{ar} = \frac{W_{ar}}{e} \cdot X \quad (2-1)$$

O valor recomendado para  $\frac{W_{ar}}{e}$  é de  $33,8 \text{ J.C}^{-1}$  [03]. Portanto,  
 no SI, tem-se:

$$D_{ar}[\text{Gy}] = 33,8 \times [\text{C.kg}^{-1}] \quad (2-2)$$

Em unidades especiais, obtêm-se:

$$D_{ar} [\text{rad}] = 33,8 \times 2,58 \times 10^{-2} \times [R]$$

$$D_{ar} [\text{rad}] = 0,872 \times [R] \quad (2-3)$$

Em Radioproteção, é conveniente estabelecer ainda uma relação entre a exposição e a dose absorvida no tecido biológico. Para este fim, é necessário imaginar uma cavidade cheia de ar, introduzida no tecido, em torno do ponto de interesse. Em condições de equilíbrio eletrônico, pode-se demonstrar que a relação entre a dose absorvida no tecido ( $D_t$ ), sem a cavidade, e a dose absorvida no ar da cavidade ( $D_{ar}$ ) é:

$$D_t = D_{ar} \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_{ar}}$$

onde:

$(\mu_{en}/\rho)_t$  = coeficiente mássico de absorção de energia do tecido;

$(\mu_{en}/\rho)_{ar}$  = coeficiente mássico de absorção de energia do ar.

Tendo em vista a equação (2-1), obtêm-se então:

$$D_t = \frac{W_{ar}}{e} \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_{ar}} \cdot X \quad (2-4)$$

Para fótons de energia entre 0,1 e 10 MeV e para o tecido mole, tem-se sensivelmente:

$$\frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_{ar}} \approx 1,15$$

Assim, no SI

$$D_t [\text{Gy}] \approx 38,8 \times [C.kg^{-1}] \quad (2-5)$$

Em unidades especiais, obtém-se:

$$D_t \text{ [rad]} \equiv X \text{ [R]} \quad (2-6)$$

### 2.2.5 Dose equivalente

Experimentos com animais em laboratório mostram que a efetividade biológica de uma dada dose absorvida no organismo depende da natureza da radiação envolvida e das condições de irradiação. Assim, para os propósitos da Radioproteção, julgou-se conveniente introduzir uma nova grandeza que possa ser melhor correlacionada com a ocorrência dos efeitos maléficos das irradiações, particularmente dos efeitos aleatórios tardios. Esta grandeza, denominada dose equivalente H, pode ser assim definida:

$$H = D Q N$$

onde:

D = dose absorvida no ponto de interesse do tecido;

Q = fator de qualidade que atende à efetividade biológica quanto ao tipo de radiação envolvida;

N = produto de outros fatores modificadores, dependentes das condições da irradiação (taxa de dose, fracionamento etc).

A dose equivalente, no SI, se exprime em  $J.kg^{-1}$ , com o nome especial de sievert (Sv). Como unidade especial, utiliza-se ainda o rem ( $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$ ).

No presente, a ICRP [02] atribui ao fator N o valor 1 e ao fator de qualidade Q valores determinados em função do poder de freamento por colisão ( $L_{\infty}$ ) na água, para a radiação em questão, no ponto de interesse. A ICRP admite, outrossim, a ado

ção de valores médios aproximados do fator de qualidade para os diferentes tipos de radiação primária:

. raios X, raios $\gamma$ e elétrons	1
. nêutrons térmicos	2,3
. outros nêutrons	10
. prótons, dêuterons e outras partículas de carga unitária e massa de repouso $\geq 1$ uma	10
. partículas $\alpha$ e outras partículas de carga $\geq 2e$	20

Cabe observar que os valores recomendados para o fator de qualidade destinam-se exclusivamente aos propósitos da Radioproteção. Em particular, a dose equivalente não deve ser utilizada para avaliar as consequências de exposição acidental do homem a altos níveis de dose (centenas de rad ou mais).

#### 2.2.6 Dose equivalente efetiva

Na prática, a exposição de um indivíduo a radiações envolve quase sempre a irradiação de mais de um órgão ou tecido. No passado, o sistema de limitação de doses recomendado pela ICRP, em tais circunstâncias, se baseou no conceito de órgão crítico : órgão considerado de maior importância, em face da dose por ele recebida, de sua radiosensibilidade e/ou de sua indispensabilidade. A limitação de dose para o indivíduo era então determinada pelo limite de dose equivalente para o órgão crítico.

Recentemente, a ICRP [02] julgou mais apropriado recomendar um procedimento que leva em consideração o risco total atribuível à exposição de todos os tecidos ou órgãos irradiados. Para isto, foi introduzido o conceito de dose equivalente efetiva. Assim, numa exposição que envolva a irradiação de um ou

mais órgãos ou tecidos, a dose equivalente efetiva  $H_E$  é definida como sendo a dose equivalente de corpo inteiro que acarretaria, para efeitos aleatórios, um risco igual ao da irradiação real não uniforme.

Imaginando que um tecido T receba uma dose equivalente  $H_T$  e sendo  $W_T$  um fator de ponderação que representa a razão entre o risco de efeito aleatório decorrente da irradiação deste tecido e o risco de efeito aleatório decorrente da irradiação uniforme de corpo inteiro, a dose equivalente efetiva, correspondente à irradiação do tecido T, será:

$$H_E = W_T H_T$$

Para uma exposição que envolva irradiação de vários tecidos, tem-se, então:

$$H_E = \sum_T W_T H_T$$

Os valores do fator de ponderação  $W_T$ , recomendados pela ICRP[02] para os diversos tecidos, são:

Tecido	$W_T$
Gônadas	0,25
Seios	0,15
Médula óssea hematopoética	0,12
Pulmões	0,12
Tireóide	0,03
Superfícies ósseas	0,03
Demais tecidos (até 5)	0,06

### 2.3 Disposições Normativas

A Comissão Nacional de Energia Nuclear, através da Resolução-CNEN-06/73, baixou as "Normas Básicas de Proteção Radiológica", em vigor no País desde a data de sua publicação no Diário Oficial, em 19.09.73. O texto destas normas foi elaborado com base nas Normas Básicas da "International Atomic Energy Agency" - IAEA (Safety Series nº 9), que por sua vez se baseou nas recomendações constantes da Publicação nº 9 da ICRP. As considerações apresentadas, a seguir, se referem às disposições normativas de maior interesse para a dosimetria individual.

As Normas Básicas da CNEN estabelecem um sistema de limitação de doses, aplicável a trabalhadores, indivíduos do público e população como um todo. No caso de trabalhadores, ou seja, de indivíduos profissionalmente expostos a radiações, estas normas estabelecem, em particular, que a dose máxima permissível para corpo inteiro é de 5 rem (50 mSv), em qualquer período de 12 meses, e de 3 rem (30 mSv), em um trimestre. Limites de dose são ainda estabelecidos para irradiações de órgãos isolados.

Cabe observar que as atuais recomendações da ICRP introduzem algumas alterações no sistema de limitação de doses anteriormente recomendado. Dentre estas alterações, cabe assinalar:

- (i) a adoção de um limite trimestral não é mais recomendada;
- (ii) para prevenção de efeitos não aleatórios, recomenda-se a adoção de um limite de dose equivalente anual de 500 mSv (50 rem) para todos os tecidos, com exceção do cristalino, para o qual se recomenda um limite de 150 mSv (15 rem);



- (iii) para limitação da ocorrência de efeitos aleatórios a um nível aceitável, recomenda-se que a dose equivalente efetiva ( $H_E$ ), em qualquer período de 12 meses, seja inferior ao limite anual de dose equivalente para irradiação uniforme de corpo inteiro, qual seja, de 50 mSv (5 rem).

No que concerne à radioproteção operacional, as Normas Básicas da CNEN exigem, em particular, que os estabelecimentos que operam com fontes de radiação implementem um sistema de controle físico, abrangendo:

- a) avaliação da constância e da eficácia dos dispositivos de proteção;
- b) verificação do funcionamento e uso correto de todos os instrumentos apropriados;
- c) levantamento e monitoração radiométricos, incluindo:
  - avaliação dos níveis, qualidade e natureza da radiação em todos os locais apropriados do estabelecimento;
  - avaliação da contaminação radioativa;
- d) estabelecimento de Áreas Controladas delimitadas e sinalizadas de maneira visível;
- e) avaliação de doses recebidas pelos trabalhadores em Áreas Controladas, sendo que:
  - as doses de radiação externa serão avaliadas por um ou mais detectores individuais de radiação, usados continuamente pela pessoa, enquanto permanecer na Área Controlada;
  - as doses de radiação interna devem ser avaliadas por qualquer método físico ou químico, que permita a avaliação da incorporação de materiais radioativos ou da atividade no órgão.

No que concerne a serviços de dosimetria individual, a CNEN

aprovou em caráter experimental, através da Resolução-CNEN-12/81, a norma "Autorização para o Funcionamento dos Laboratórios de Serviços de Monitoração Individual", que estabelece os requisitos e condições necessárias, exigidas pela CNEN, para o licenciamento da construção e autorização para funcionamento de laboratórios que prestem serviços de monitoração individual. Em seu parágrafo 6.13, referente a requisitos de instrumentação, esta norma estabelece, em particular, que "o laboratório deve ter um programa de controle de qualidade e a instrumentação para realizá-lo".

## 2.4 Dispositivos Utilizados para Medição de Doses Individuais

### 2.4.1 Filmes dosimétricos

Historicamente, as emulsões fotográficas foram os primeiros detectores de radiação. Para fins de dosimetria, já em 1902, Rollins sugeriu o emprego de uma chapa fotográfica para indicação de um limite de dose de radiação não prejudicial à saúde[11]. O uso de filmes fotográficos para dosimetria individual está hoje amplamente consagrado.

Os filmes dosimétricos são constituídos de uma película de acetato de celulose (ou de papel) sobre a qual é depositada a emulsão fotográfica, que é a parte sensível do filme. Esta emulsão é composta de pequenos cristais (grãos) de brometo de prata ( $\text{Ag}^+\text{Br}^-$ ), dispersos em uma gelatina.

As radiações ionizantes, incidindo sobre o filme, transferem energia a cristais de brometo de prata, o que dá origem a uma seqüência de eventos, cujo resultado final é a transformação de alguns íons de prata em átomos de prata metálica. Os grãos de brometo de prata, assim "impressionados" pela radia

ção, constituem a imagem latente.

Submetendo-se o filme ao processo de revelação, os grãos impressionados pela radiação, ou seja, os cristais de brometo de prata que contêm átomos de prata metálica, são quimicamente alterados por um agente redutor (revelador), que transforma os demais íons de prata destes cristais em prata metálica. No processo subsequente de fixação, somente estes cristais alterados permanecem na emulsão, sendo os demais dissolvidos e eliminados da mesma, com auxílio de um agente químico.

Após a fixação, a emulsão apresenta um enegrecimento, devido à presença dos grãos de prata metálica. A medida do enegrecimento do filme é feita com auxílio de um feixe luminoso que o atravessa. Define-se a densidade ótica (DO) do filme pela relação:

$$DO = \log \frac{I_0}{I}$$

onde:

$I_0$  = intensidade do feixe luminoso que atinge o filme,

$I$  = intensidade do feixe luminoso que atravessa o filme.

As leituras de densidade ótica são efetuadas com auxílio de um densitômetro ótico.

Para conversão das leituras de densidade ótica em doses recebidas pelos filmes irradiados, é necessário proceder à calibração dos filmes. Para este fim, um conjunto de filmes é irradiado em condições controladas, utilizando-se fontes radioativas padrões ou feixes de raios X de características determinadas. Efetuando-se as leituras de densidade ótica dos filmes assim irradiados, pode-se levantar experimentalmente a curva de resposta de densidade ótica versus dose ou exposição.

A Figura 2.1 mostra a forma da curva típica de variação da densidade ótica com a dose, para um determinado espectro de energia.

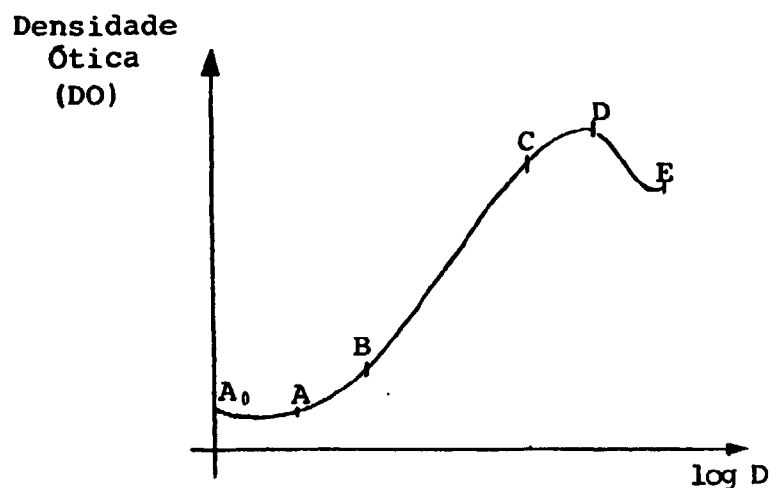


FIG. 2.1 - CURVA DE DENSIDADE ÓTICA VERSUS DOSE

Na figura, podem-se distinguir 5 regiões [04]:

- Região A<sub>0</sub>A - Região de inércia - A densidade ótica não varia sensivelmente com a dose;
- Região AB - Região de subexposição - A densidade ótica cresce ligeiramente com a dose;
- Região BC - Região de linearidade - A densidade ótica cresce linearmente com a dose;
- Região CD - Região de superexposição - A densidade ótica tende a permanecer constante com a dose;
- Região DE - Região de solarização - A densidade ótica diminui com a dose.

Para a radiação eletromagnética, observa-se que a resposta dos filmes dosimétricos depende acentuadamente da energia dos fótons incidentes. Por esta razão, é necessário levantar curvas de calibração para diferentes energias ou espectros de radiação X e gama, e ainda montar os filmes num suporte contendo absorvedores seletivos (filtros), que possibilitam avaliar a qualidade da radiação incidente.

Um outro problema associado à dosimetria fotográfica se deve ao desvanecimento progressivo das imagens latentes ("fading"). Este efeito, que ocorre após a exposição do filme e antes de sua revelação, é atribuído à oxidação dos grãos de prata pelo oxigênio do ar, em presença de umidade [05].

Normalmente, os filmes utilizados em dosimetria apresentam duas ou três emulsões de diferentes sensibilidades, o que permite cobrir uma extensa faixa de exposições (aproximadamente, de  $3 \mu\text{C. kg}^{-1}$  a  $3 \text{ C. kg}^{-1}$  ou, equivalentemente, de 10 mR a 10000 R).

Entre as vantagens do filme, incluem-se registro permanente da informação, ampla faixa de exposição, baixo peso para a maioria das aplicações e registro simultâneo de diferentes tipos de radiação. Como desvantagens, têm-se: dependência energética, sensibilidade a pequenas variações nas condições de processamento, desvanecimento da imagem latente, sensibilidade às condições de temperatura e umidade em muitas aplicações e dependência com a direção da radiação.

#### 2.4.2 Dosímetros termoluminescentes (TLD)

Os dosímetros termoluminescentes são constituídos por certos cristais iônicos que, expostos a um campo de radiação, possuem a propriedade de armazenar uma fração da energia a eles transferida pela radiação, liberando-a posteriormente em forma de luz, ao serem submetidos a um aquecimento apropriado. Dentre os materiais que exibem este fenômeno (termoluminescência), incluem-se os cristais de  $\text{LiF}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , geralmente dopados com determinadas impurezas (Dy, Mn, Sm).

O princípio básico da termoluminescência é resumido a seguir. Partículas carregadas, primárias ou secundárias, atravessando o cristal, transferem sua energia a elétrons da banda de

valência, deslocando-os para a banda de condução e deixando buracos positivos na banda de valência. Os elétrons e os buracos migram através do cristal até se recombinarem ou serem aprisionados em armadilhas, na região de energia entre a banda de valência e a banda de condução. Durante o aquecimento posterior do cristal, podem ocorrer dois processos:

- 1) um elétron aprisionado, recebendo energia suficiente para escapar de sua armadilha, desloca-se para a banda de condução, onde se locomove até ser capturado por uma armadilha que contém um buraco, emitindo luz na recombinação;
- 2) um buraco aprisionado, recebendo energia suficiente para escapar de sua armadilha, desloca-se para a banda de valência, onde se locomove até se recombinar com um elétron aprisionado.

Em princípio, a intensidade de luz emitida durante o aquecimento é proporcional à população de armadilhas produzidas durante a irradiação que, por sua vez, é proporcional à dose absorvida no dosímetro.

Algumas características dos principais cristais termoluminescentes (fósforos) são apresentadas na Tabela 2.2.

Na faixa de baixas energias de radiação gama ( $E_{\gamma} \lesssim 100$  keV), os cristais termoluminescentes apresentam uma certa dependência da resposta com a energia dos fótons. Para os dosímetros correntemente utilizados, a dependência da resposta com a energia se mostra mais acentuada na seguinte ordem crescente:  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{LiF}$ , vidro de silicato de alumínio, vidro de fosfato de alumínio,  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{CaF}_2$ .

Os dosímetros termoluminescentes cobrem uma ampla faixa de doses (aproximadamente, de 100 mGy a 100 Gy ou, equivalente, de 1 mrad a 10.000 rad).

Tabela 2.2 - Características dos Principais Cristais Termoluminescentes (Fósforos)

FÓSFORO	Nº ATÔMICO EFETIVO	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	TEMP. DO PICO DE EMISSÃO PRINC. (°C)	COMPR. DE ONDA (Å) *	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	DESVANECIAMENTO
LiF	8,2	2,64	195	4.000	mR até 10 <sup>5</sup> R	<5% em 12 semanas
CaF <sub>2</sub> Nat.	16,3	3,18	260	3.800	mR até 10 <sup>4</sup> R	não detectável
CaF <sub>2</sub> : Mn (TLD-400)		3,18	260	5.000	mR até 10 <sup>5</sup> R	-10% no 1º mês
CaF <sub>2</sub> : Dy (TLD-200)			180	5.765	mR até 10 <sup>5</sup> R	-10% nas 1ªs horas e 16% em 2 sem.
CaSO <sub>4</sub> : Mn	15,3	2,61	110	5.000	µR até 10 <sup>4</sup> R	-50% nas 1ªs 24 h
CaSO <sub>4</sub> : Sm			300	6.200	lR até 10 <sup>4</sup> R	
CaSO <sub>4</sub> : Dy	15,5		230	5.700	mR até 10 <sup>5</sup> R	2% em 1 mês 8% em 1 mês
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Mn	7,4	2,3	200	6.050	mR até 10 <sup>4</sup> R	-10% no 1º mês

\* Valor correspondente à intensidade máxima do pico de emissão termoluminescente

A unidade de leitura dos dosímetros termoluminescentes é constituída basicamente de um circuito de aquecimento do dosímetro, de uma válvula fotomultiplicadora, destinada a transformar a intensidade de luz emitida em corrente elétrica, e de um circuito destinado a indicar o resultado da corrente integrada. Normalmente, a unidade de leitura pode ser acoplada a um registrador gráfico, que permite registrar a curva de emissão do dosímetro.

Entre as vantagens dos TLD, incluem-se a alta sensibilidade, fraca dependência com a energia, reutilização do mesmo cristal para várias medidas, pouca dependência com a direção da radiação. Como desvantagem, têm-se a perda da informação durante a leitura e a dependência da sensibilidade com o tempo de utilização do material.

#### 2.4.3 Caneta dosimétrica

A caneta dosimétrica é um dosímetro de bolso de uso corrente em radioproteção para avaliação de doses individuais recebidas em períodos curtos.

Seu funcionamento é baseado na ionização produzida num gás pela radiação. O dosímetro consiste, basicamente, em uma câmara de ionização cilíndrica, de pequenas dimensões, constituída por um fio central (anodo) envolto por uma carcaça condutora (catodo), sendo o fio e a carcaça bem isolados um do outro.

Para utilização do dosímetro, aplica-se previamente uma tensão  $V_0$  entre os dois eletrodos, com auxílio de uma fonte de tensão, que é a seguir removida. Deste modo, os eletrodos da câmara armazenam uma carga  $Q_0 = C V_0$ , onde  $C$  é a capacitância da câmara.



Supondo que o dosímetro seja subsequentemente exposto a um campo de radiação X ou gama, a ionização produzida no gás da câmara pela radiação incidente provocará uma redução na carga  $Q_0$  inicialmente armazenada. Sendo  $\Delta n$  o número de pares de íons liberados no interior da câmara pela radiação, a diminuição  $\Delta Q$  na carga da câmara é proporcional a  $\Delta n$  ( $\Delta Q = e \cdot \Delta n$ ) e, em princípio, proporcional à exposição X.

Nas canetas de leitura direta, a medida da variação da carga é feita por meio de um eletroscópio, incorporado ao próprio dosímetro. Nas canetas de leitura indireta, esta medida é feita com auxílio de um eletrômetro, incorporado à unidade de carregamento e leitura ("charger-charge reader").

Em ambos os casos, as leituras de carga são calibradas para indicar diretamente a exposição em miliroentgen (mR).

#### 2.4.4 Dosímetros radiofotoluminescentes

Estes dosímetros vêm sendo também bastante utilizados em dosimetria individual. Similares aos dosímetros termoluminescentes, eles apresentam, no entanto, a vantagem de preservar a informação recebida, depois de efetuada a leitura. O detector fotoluminescente mais amplamente usado é o vidro de fosfato, ativado com prata. A radiofotoluminescência desse material é caracterizada pelo aumento na emissão fluorescente, depois de sua exposição à radiação ionizante. Essa emissão fluorescente ocorre por excitação com luz ultravioleta.

Durante a irradiação do material com raios X ou gama, formam-se no mesmo bandas de absorção na região ultravioleta, devidas à criação de diversos tipos de centros fotoluminescentes. A luminescência produzida por excitação desses centros com luz ultravioleta é proporcional ao número de centros criados durante a irradiação e este, por sua vez, é proporcional à

- exposição recebida, dentro de um certo intervalo. Portanto, a luminescência é proporcional à exposição recebida.

A precisão obtida na medida de exposição com dosímetros de vidro é da ordem de 10% para 10 mR, 5% para 25 mR e 2% para valores superiores a 50 mR de radiação gama. Esta precisão é alcançada quando são empregados métodos de limpeza apropriados e condições normais de laboratório.

Os dosímetros radiofotoluminescentes, assim como os termoluminescentes, apresentam muitas vantagens sobre os filmes dosimétricos: maior exatidão, menor dependência da resposta com a energia, maior extensão da faixa de doses medida, mínima dependência com a direção da radiação, mínimo desvanescimento, estabilidade durante o armazenamento, utilização de um mesmo dosímetro diversas vezes, leitura simples e reprodutibilidade. As desvantagens em relação aos filmes são triboluminescência para baixas doses e dependência da sensibilidade com a história do material.

## 2.5 Procedimentos de Dosimetria Individual Utilizados no CDTN

### 2.5.1 Introdução

O Serviço de Dosimetria Individual do CDTN utiliza em rotina a dosimetria fotográfica. A dosimetria termoluminescente vem sendo utilizada para controle diário de doses individuais na Área Controlada (AC-1), sendo também gradualmente implantada no controle de doses ambientais. Mais recentemente, a dosimetria termoluminescente foi introduzida para controle dos resultados de doses individuais obtidos com filmes dosimétricos (Inspeção por Amostragem).

Até o início de 1983, o Serviço de Dosimetria utilizava o fil

me importado KODAK PATHÉ, tipo 1, com três emulsões, montado num suporte com diversos filtros; daí em diante, passou a utilizar o filme AGFA GEVAERT (adquirido no País), com duas emulsões, montado num suporte simples com um único filtro de cobre de 0,6mm.

Para controle diário de doses individuais na AC-1, utiliza-se o dosímetro termoluminescente TLD-200, tipo  $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ . Os dosímetros termoluminescentes TLD-100 e TLD-700, tipo LiF, são utilizados, respectivamente, na determinação de doses ambientais e no controle dos resultados obtidos com filmes.

Descrivem-se a seguir, de forma sucinta, as diversas etapas envolvidas na prestação de serviços de dosimetria fotográfica pelo CDTN, desde o cadastramento dos usuários até a emissão dos resultados.

### 2.5.2 Funcionamento do Serviço de Dosimetria Fotográfica

A prestação de serviços de dosimetria individual pelo CDTN inicia-se com o cadastramento junto à CNEN da entidade solicitante, dos trabalhadores que serão individualmente controlados e da pessoa que será responsável pela proteção radiológica na entidade. A entidade é ainda cadastrada junto ao CDTN, fornecendo, paralelamente, os dados referentes às fontes de radiação por ela utilizadas.

Concluída esta fase de cadastramento, o CDTN encaminha os dosímetros para uso, através de uma listagem de remessa. Juntamente com a primeira remessa, são encaminhadas as recomendações acerca do controle dosimétrico individual. Os dosímetros encaminhados à entidade trazem o nome do usuário e o período de utilização (os filmes dosimétricos trazem também um número gravado, por pressão, que permanece mesmo após a revelação). Junto com a remessa de dosímetros é encaminhado um "dosímetro

padrão", que permanecerá na entidade durante o período de utilização dos dosímetros. Este dosímetro serve para medir a dose de radiação natural na instalação, que é subtraída das doses de radiação recebidas pelos trabalhadores. Este dosímetro deve permanecer no local utilizado para guardar os dosímetros, quando não estão em uso.

Passado o período de utilização dos dosímetros, a entidade recebe nova remessa de dosímetros, para o próximo período, e encaminha ao CDTN os dosímetros utilizados e o "dosímetro padrão", informando, na própria listagem de remessa referente aos dosímetros utilizados, as eventuais anormalidades ocorridas com os dosímetros ou com os usuários.

Uma vez recebidos pelo CDTN, os dosímetros são conferidos e as observações lançadas na listagem de remessa são anotadas em folhas de codificação, com o objetivo de atualizar o banco de dados.

A avaliação das doses recebidas pelos dosímetros obedece a uma seqüência de operações, representada de forma simplificada na Figura 2.2.

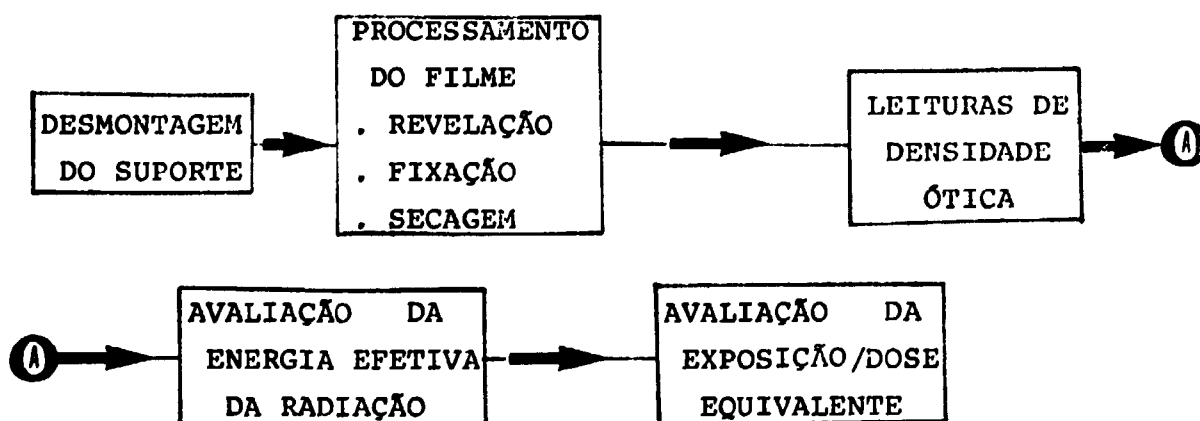


FIG. 2.2 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCEDIMENTO UTILIZADO PARA AVALIAÇÃO DE DOSES

A avaliação da energia efetiva da radiação eletromagnética que provocou a exposição do filme é feita através da determinação da razão entre a leitura de densidade ótica na faixa nua do filme (JA) e a leitura na faixa coberta por filtro de cobre de 0,6mm(CU<sub>6</sub>). Utilizando curva de calibração previamente levantada (Figura 2.3), avalia-se então a energia efetiva da radiação incidente.

Durante o processamento dos filmes, são controlados os seguintes parâmetros:

- a) temperatura do banho de revelação;
- b) temperatura do banho interruptor;
- c) temperatura do banho fixador;
- d) tempo de permanência no banho de revelação;
- e) tempo de permanência no banho interruptor;
- f) tempo de permanência no banho fixador;
- g) pH do banho de revelação;
- h) pH do banho interruptor;
- i) pH do banho fixador;
- j) concentração dos reagentes nos banhos.

Para controle da matéria prima, faz-se a revelação de dez filmes retirados aleatoriamente das caixas recebidas do fabricante ou fornecedor.

Para cada revelação completa e também com base mensal, são feitas revelações de filmes virgens, para controle da densidade ótica espúria e da sensibilidade do filme, e ainda para de terminar a eficiência das soluções de processamento.

Os resultados finais de dose são introduzidos em memória de computador. A listagem de resultados e de ocorrências e as e

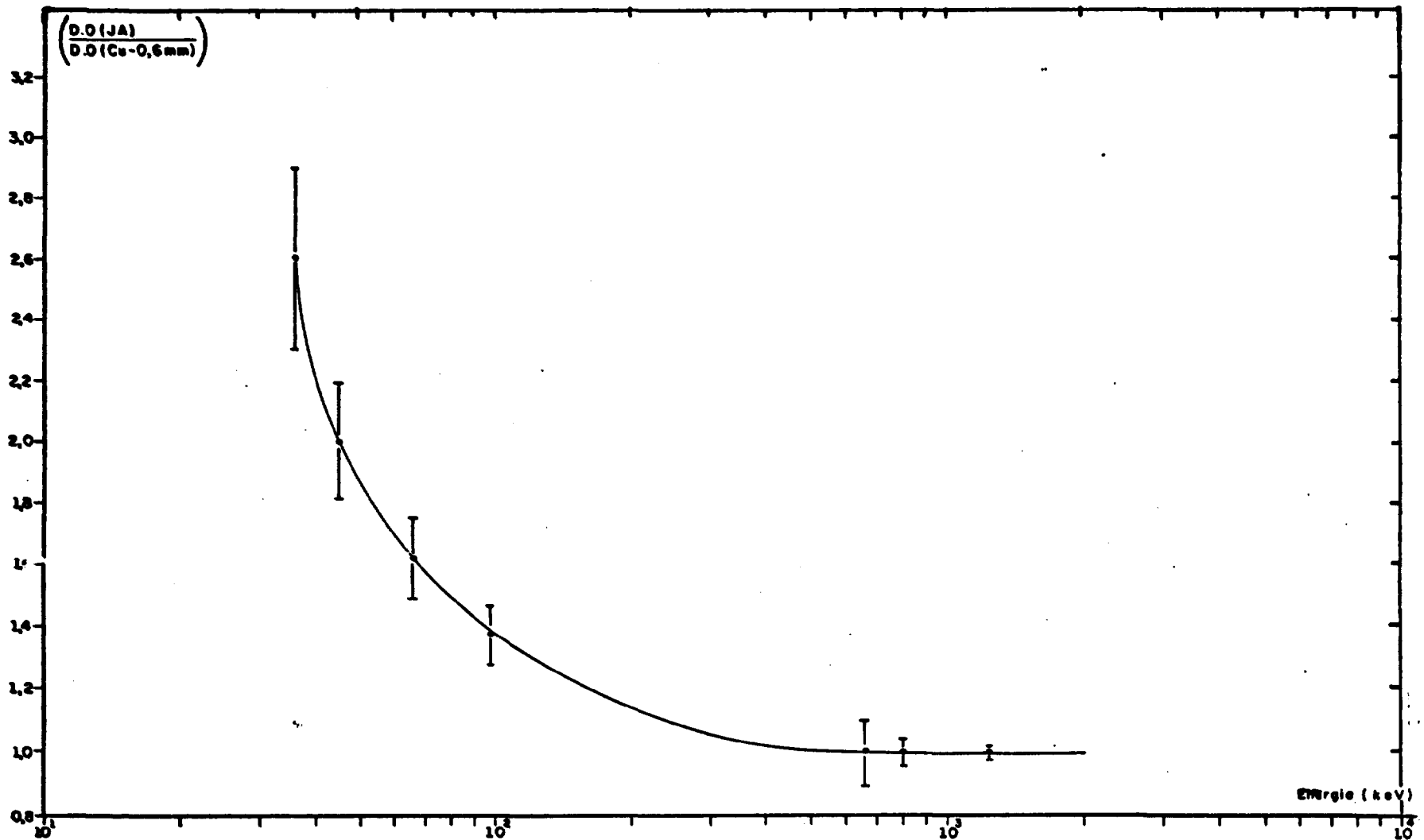


FIG. 2.3 - CURVA DE RAZÃO DE DENSIDADE ÓTICA VERSUS ENERGIA PARA O FILME AGFA GEVAERT

tiquetas de endereço da entidade são emitidas em relatórios de computador. Posteriormente, encaminham-se os relatórios à entidade e à CNEN.

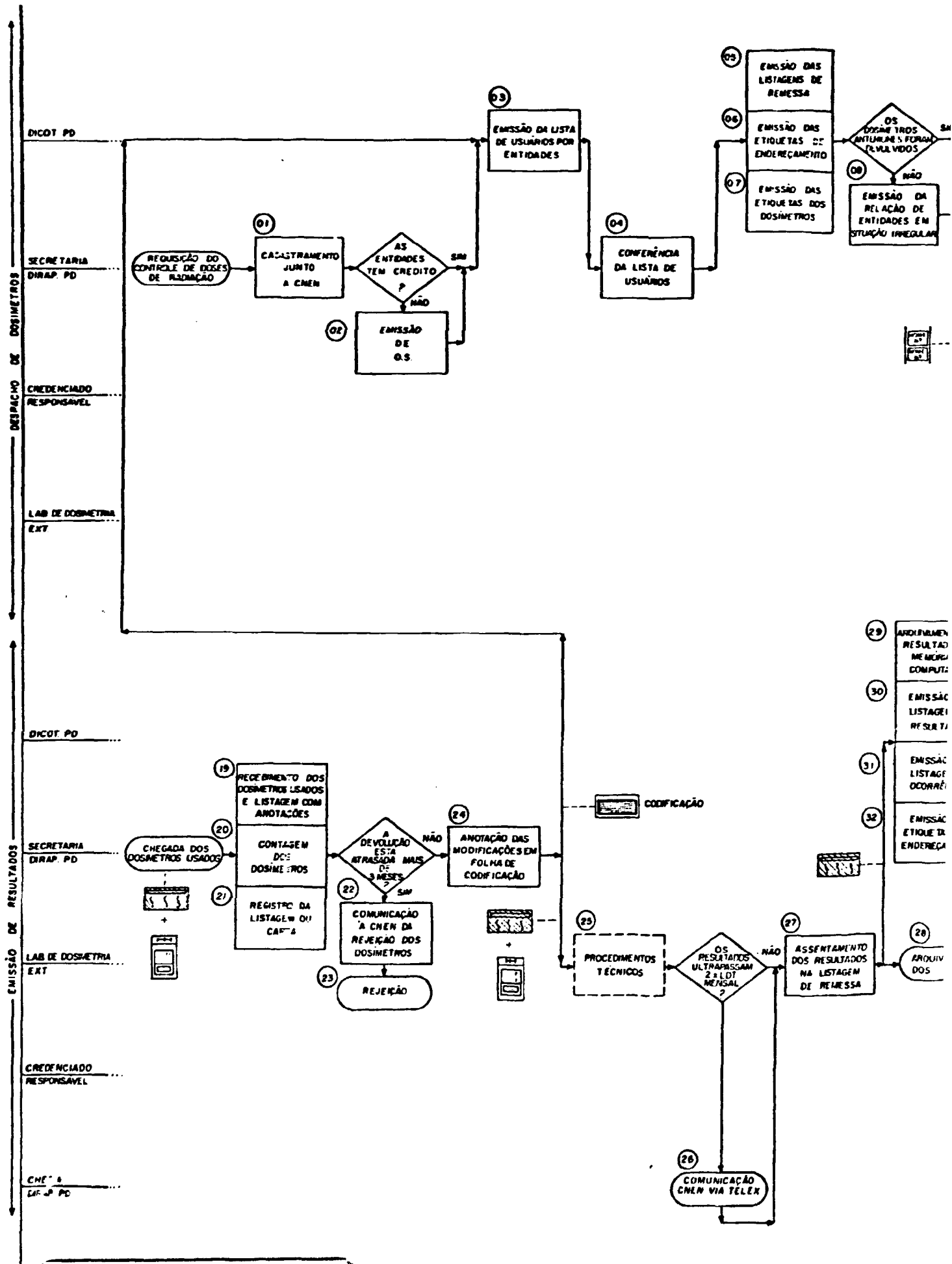
A Figura 2.4 mostra o fluxograma operacional do Serviço de Dosimetria Fotográfica.

### 2.5.3 Procedimentos de dosimetria termoluminescente

O processo de medição de doses através de dosímetros termoluminescentes (TLD) obedece, no CDTN, à seguinte rotina:

- a) desmontagem do suporte do dosímetro;
- b) tratamento térmico do TLD a  $100^{\circ}\text{C}$  durante 10 minutos, para eliminar a emissão termoluminescente de baixa temperatura;
- c) colocação do TLD na unidade de leitura;
- d) leitura da corrente integrada em nanocoulombs;
- e) retirada do TLD da unidade de leitura e armazenamento até nova distribuição;
- f) conversão da leitura em exposição através da curva de calibração;
- g) tratamento térmico do TLD a  $400^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora e a  $100^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas, para 'limpar' o TLD, quando de sua reutilização.

Em paralelo à rotina de processamento dos dosímetros termoluminescentes, são realizadas, de forma sistemática, diversas operações de controle, incluindo inspeção visual dos dosímetros, exame das curvas de intensidade de emissão termoluminescente versus temperatura de aquecimento, verificação das condições operacionais da unidade de leitura e verificação das características de exatidão e reprodutibilidade do procedimento de medida.



# SECTION 1



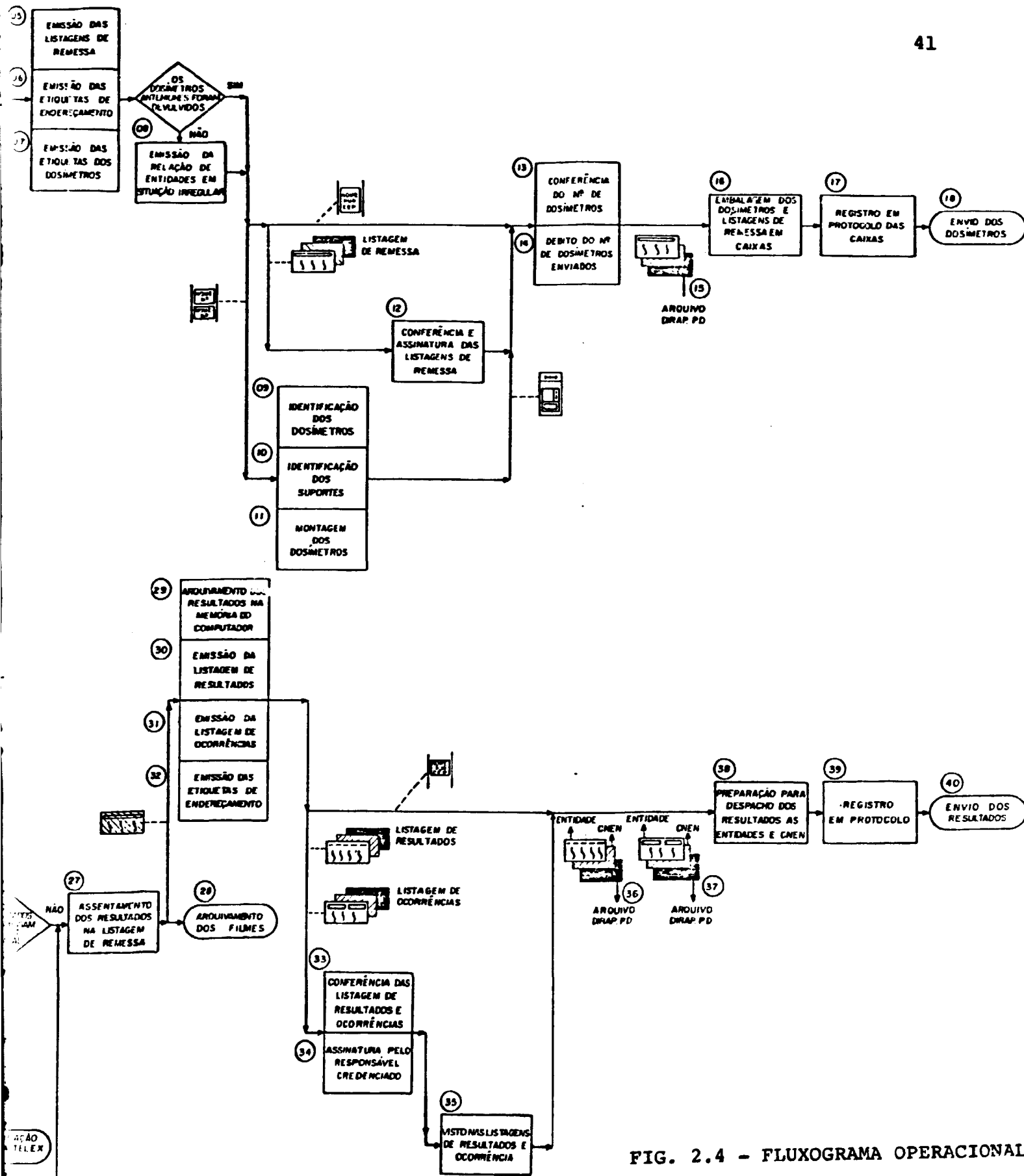


FIG. 2.4 - FLUXOGRAMA OPERACIONAL DO SERVIÇO DE DOSIMETRIA FOTOGRAFICA DO CDTN.

#### 2.5.4 Calibração e aferição

Como calibração, entende-se aqui a operação que visa converter as leituras instrumentais (respostas) dos dosímetros em valores correspondentes de exposição.

No caso dos filmes dosimétricos, a calibração é feita através do levantamento das curvas de densidade ótica líquida versus exposição, para diversas energias de radiação gama e espectros de raios X. Para este fim, um conjunto de filmes de um mesmo lote é irradiado, em condições controladas, com uma mesma fonte gama padrão ou com um feixe de raios X de características conhecidas. As fontes de radiação gama utilizadas são fontes padrões de Cs-137, Ra-226 e Co-60, e os feixes de raios X normalmente utilizados possuem energias efetivas de 37, 45, 104 e 140 keV. A Figura 2.5 mostra, como exemplo, as curvas de calibração para as três emulsões do filme KODAK, obtidas com feixe de raios X de energia efetiva igual a 45 keV.

No caso dos dosímetros termoluminescentes, a curva de calibração (corrente integrada versus exposição) é levantada apenas para a radiação gama do Co-60, uma vez que, acima de 100 keV, a resposta destes dosímetros é praticamente independente da energia dos fótons incidentes. A Figura 2.6 mostra a curva de calibração do TLD-700, obtida com uma fonte padrão de Co-60.

Além das calibrações periódicas, o Serviço de Dosimetria do CDTN efetua rotineiramente testes de exatidão, mediante a comparação dos valores de exposições conhecidas com os obtidos experimentalmente através dos procedimentos utilizados.

#### 2.6 Especificações quanto aos Resultados de Dose

Conforme mencionado na Seção 1.1, o estabelecimento de especi

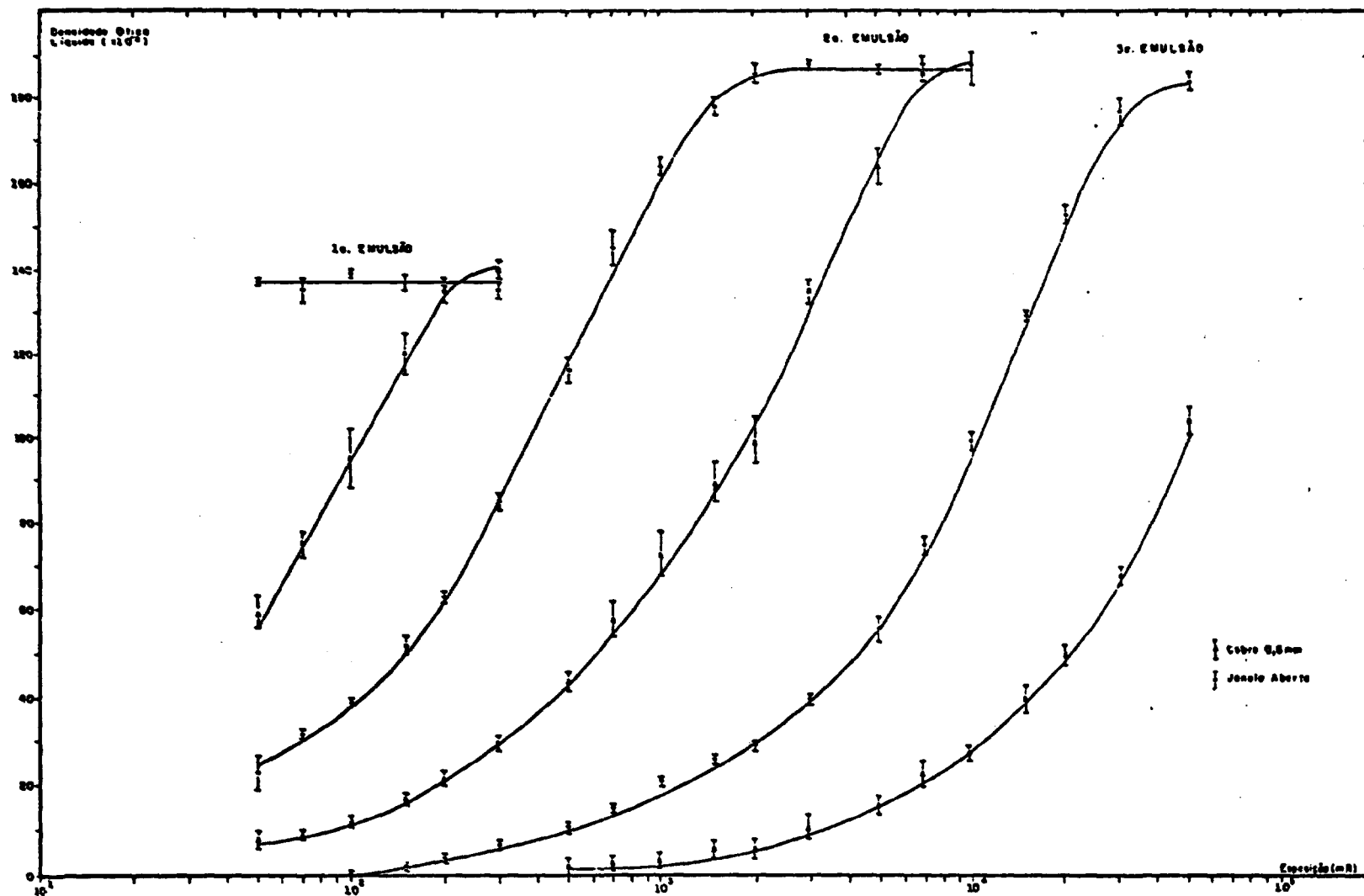


FIG. 2.5 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO FILME DOSIMÉTRICO KODAK PATHE EM 45 KEV.

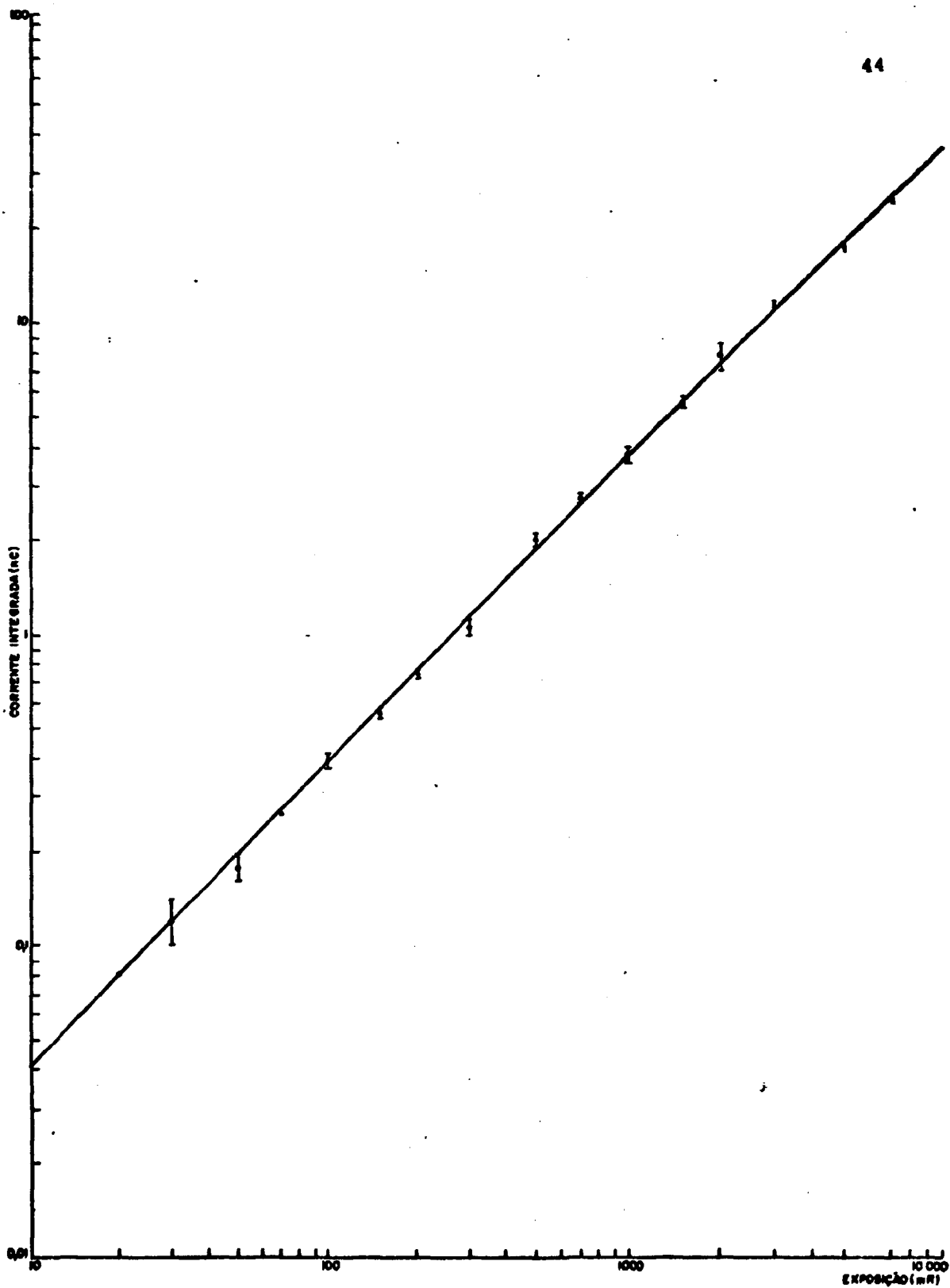


FIG. 2.5 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TLD-700 EM FONTE DE COBALTO-60

ficações atende ao propósito de exprimir a qualidade de um produto ou serviço em bases objetivas, como meio de harmonizar os interesses de fabricantes ou prestadores de serviço e consumidores ou usuários.

No caso de laboratórios que fornecem resultados de medição, colocam-se entre as principais características da qualidade do serviço, o prazo de resposta e o grau de correção dos resultados. No caso específico de serviços de dosimetria individual, a CNEN, como órgão normativo e fiscalizador, estabeleceu que o erro relativo na determinação da exposição, na energia de calibração e nas condições normais de laboratório, deverá ser inferior a 50%, no intervalo de 10 a 50 mR, e inferior a 20%, acima de 50 mR [06]. A sistemática de controle da qualidade proposta neste trabalho visa, em particular, ao atendimento desta especificação.

### 3. DESCRIÇÃO DA SISTEMÁTICA DE CONTROLE PROPOSTA

#### 3.1 Introdução

Como foi mencionado em 1.2, a relevância das ações ou decisões tomadas com base em resultados de medições impõe o grau de correção ou validade com o qual tais resultados devem ser obtidos. Para fins de controle, é conveniente especificar a "qualidade" de resultados de medição em termos de requisitos de precisão e de exatidão:

- requisito de precisão: a dispersão dos resultados obtidos por repetição das medidas, normalmente caracterizada pelo desvio padrão ou pelo desvio padrão relativo, não deve superar um valor especificado;
- requisito de exatidão: os erros sistemáticos associados ao procedimento de medição adotado devem ser reduzidos ao nível das incertezas aleatórias ou limitados a um valor especificado.

Admitindo que o procedimento adotado para obtenção dos resultados atenda, em princípio, aos requisitos pré-estabelecidos, é necessário assegurar ainda que esta situação será mantida ao longo da produção de resultados em rotina. Em particular, o estabelecimento de uma sistemática para controle da qualidade de serviços de dosimetria individual visa atender esse objetivo, qual seja, o de manter os graus de precisão e exatidão dos resultados de dose obtidos em rotina dentro de limites prefixados.

Com certas adaptações, é possível aplicar para serviços de dosimetria individual as mesmas técnicas de controle da qualidade tradicionalmente utilizadas na produção industrial. Assim, mediante a introdução de "dosímetros de controle", o processa

mento dos dosímetros pode ser controlado pela técnica estatística dos Gráficos de Controle, correntemente utilizada pelo produtor, para controle do processo de fabricação. Da mesma forma, para controle do "produto final", que no caso de serviços de dosimetria são os próprios resultados de dose produzidos em rotina, pode-se aplicar uma técnica similar à Inspeção por Amostragem, mediante a comparação de uma parte dos resultados de rotina com os obtidos por método alternativo de maior confiabilidade.

### 3.2 Gráficos de Controle

#### 3.2.1 Colocação do problema

Os resultados obtidos por repetição de medidas apresentam uma variabilidade natural e inevitável, cujas características podem ser previstas pelo modelo estatístico da distribuição normal. Este modelo, confirmado pela experiência, prevê que os resultados individuais ( $x$ ) se distribuem simetricamente em torno de uma média ideal ( $\mu$ ), com uma dispersão caracterizada por um desvio padrão ( $\sigma$ ), que é específico de cada caso de medição. Em particular, o modelo prevê que os resultados se distribuem segundo as seguintes proporções aproximadas: 68% no intervalo  $\mu \pm \sigma$ , 95% no intervalo  $\mu \pm 2\sigma$  e 99,7% no intervalo  $\mu \pm 3\sigma$ .

Ao longo de uma rotina de medições, causas inadvertidas, porém identificáveis, podem provocar alterações significativas destas características de variabilidade. A técnica estatística dos Gráficos de Controle, aplicada a serviços de dosimetria, visa essencialmente detectar a interferência de tais causas no processo de medição de doses, mediante a comparação sistemática das variações observadas nos resultados obtidos por repetição com as variações previstas pelo modelo estatís

tico.

Para este fim, são utilizados "dosímetros de controle", introduzidos de forma sistemática na rotina normal de processamento. Estes dosímetros de controle são dosímetros irradiados em condições bem definidas de exposição (X) e energia (E), atendendo ainda a condições de boa geometria e de local de irradiação livre de espalhamento.

### 3.2.2 Metodologia proposta

Em cada processamento normal de dosímetros, são introduzidos dosímetros de controle, irradiados em condições controladas, e ainda dosímetros virgens (não irradiados).

O tratamento dos resultados de dose obtidos para os dosímetros de controle é feito de acordo com a seguinte metodologia [07, 08, 09]:

a) Grupamento dos dados:

Para cada tipo de dosímetro de controle (dosímetros irradiados nas mesmas condições), os resultados individuais (x) são ordenados em subgrupos de 4 resultados consecutivos;

b) Variáveis de controle:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} = \text{média amostral de um subgrupo} \\ R = x_{\max} - x_{\min} - \text{amplitude de um subgrupo} \end{array} \right.$$

c) Hipótese básica

x - variável normal de média  $\mu_0$  e desvio padrão  $\sigma_0$

d) Especificação dos limites de controle

Adotando o sistema americano (normas da ASA e da ASTM), os limites de controle inferior (LIC) e superior (LSC) são



assim especificados:

- Gráfico da média  $\bar{x}$

$$\Pr (\text{LIC} \leq \bar{x} \leq \text{LSC} \mid \mu = \mu_0; \sigma = \sigma_0) = 99,7\%$$

Com base nas propriedades da distribuição normal, obtém-se:

$$\begin{cases} \text{LIC} = \mu_0 - 3 \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \\ \text{LSC} = \mu_0 + 3 \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \end{cases}$$

Para subgrupos de  $n=4$  resultados individuais, tem-se:

$$\begin{cases} \text{LIC} = \mu_0 - 1,5\sigma_0 \\ \text{LSC} = \mu_0 + 1,5\sigma_0 \end{cases}$$

- Gráfico da amplitude R

$$\Pr (\text{LIC} \leq R \leq \text{LSC} \mid \sigma = \sigma_0) = 99,7\%$$

Com base na distribuição de amplitudes de variável normal, obtém-se:

$$\begin{cases} \text{LIC} = D_1 \sigma_0 \\ \text{LSC} = D_2 \sigma_0 \end{cases}$$

Para subgrupos de  $n=4$  resultados individuais, tem-se (Tabela I.1 do Apêndice I ):

$$\begin{cases} \text{LIC} = 0 \\ \text{LSC} = 4,698\sigma_0 \end{cases}$$

e) Determinação experimental dos limites de controle

Como a média  $\mu_0$  e o desvio padrão  $\sigma_0$  da população dos resultados  $x$  não são conhecidos, é necessário calcular estimativas relativamente precisas desses parâmetros. Para este fim, adota-se o seguinte procedimento:

- inicia-se o processo de obtenção dos resultados dos dosímetros de controle, deixando-se acumular resultados em número suficiente para constituir 25 subgrupos de 4 resultados (o formulário utilizado para coleta de dados e cálculo dos limites de controle é apresentado no Apêndice II).

Calculam-se:

$$\begin{cases} \bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_1^k \bar{x}_i & - \text{ média das médias} \\ \bar{R} = \frac{1}{k} \sum_1^k R_i & - \text{ amplitude média} \end{cases}$$

Considerando  $k = 25$  subgrupos, tem-se:

$$\begin{cases} \bar{\bar{x}} = \frac{1}{25} \sum_1^{25} \bar{x}_i \\ \bar{R} = \frac{1}{25} \sum_1^{25} R_i \end{cases}$$

- adotam-se para a média  $\mu_0$  e o desvio padrão  $\sigma_0$ , as estimativas  $\hat{\mu}_0$  e  $\hat{\sigma}_0$ , assim determinadas:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_0 = \bar{\bar{x}} \\ \hat{\sigma}_0 = \frac{\bar{R}}{d_2} = 0,485 \bar{R} \text{ (para } n=4, d_2 = 2,059) \end{cases}$$

- calculam-se os limites de controle aproximados:

$$\bar{x}: \begin{cases} \text{LIC} \cong \hat{\mu}_0 - 1,5 \hat{\sigma}_0 = \bar{\bar{x}} - 0,729 \bar{R} \\ \text{LSC} \cong \hat{\mu}_0 + 1,5 \hat{\sigma}_0 = \bar{\bar{x}} + 0,729 \bar{R} \end{cases}$$

$$R: \begin{cases} \text{LIC} = 0 \\ \text{LSC} \cong 4,698 \hat{\sigma}_0 = 2,282 \bar{R} \end{cases}$$

f) Interpretação dos limites de controle

Dentro da hipótese de que a média e o desvio padrão da população permaneçam constantes, espera-se que:

- aproximadamente 99,7% dos resultados  $\bar{x}$  (ou R) caiam entre LIC e LSC;
- aproximadamente 0,15% dos resultados  $\bar{x}$  (ou R) caiam abaixo de LIC;
- aproximadamente 0,15% dos resultados  $\bar{x}$  (ou R) caiam acima de LSC.

g) Análise dos resultados e ações corretivas

- Análise dos resultados iniciais

Os dados  $(\bar{x}_i, R_i)$  dos 25 subgrupos utilizados para calcular os limites de controle são, de início, confrontados com os respectivos limites de controle. A ocorrência de pontos fora da faixa de controle deve ser interpretada como não conformidade com a hipótese  $\mu = \mu_0$  e/ou  $\sigma = \sigma_0$ , dentro do nível de significância adotado ( $\alpha = 0,3\%$ ). Tais pontos são geralmente eliminados, recalculando-se com os pontos restantes os novos limites de controle. Este procedimento é eventualmente repetido, até que todos os pontos restantes caiam na faixa de controle.

Com os limites de controle assim corrigidos, preparam-se os gráficos da média e da amplitude, conforme mostram as Figuras 3.1 e 3.2.

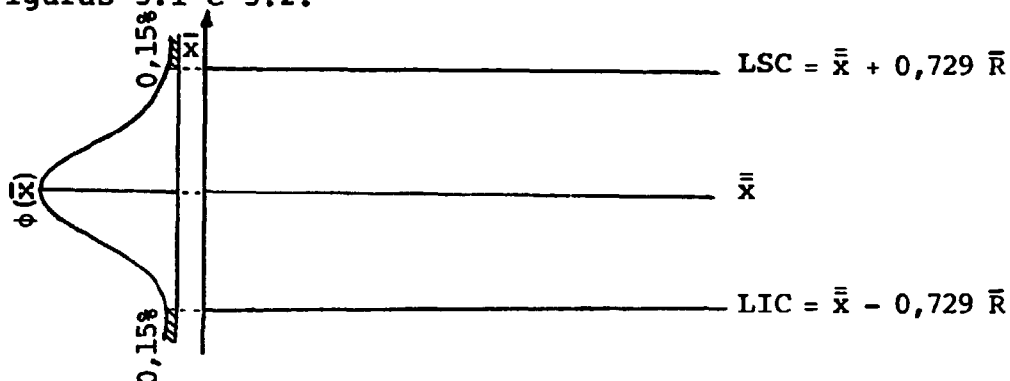


Fig. 3.1 - Preparação do gráfico da média

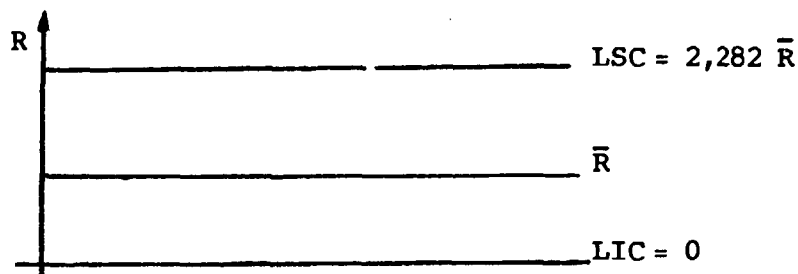


Fig. 3.2 - Preparação do gráfico da amplitude

#### - Análise dos resultados subsequentes

Os resultados subsequentes das variáveis  $\bar{x}$  e  $R$  são marcados nos respectivos gráficos de controle, à medida que são obtidos. A ocorrência de qualquer ponto fora da faixa de controle constitui indicação de uma causa identificável de perturbação no processo de medição, que deve ser portanto investigada.

Em princípio, podem-se conceber dois tipos principais de perturbação:

- . alteração da média  $\mu$ , mantendo-se  $\sigma$  constante: neste caso, o gráfico da média mostrará uma série de pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central;

- . aumento da dispersão, mantendo-se a média  $\mu$  constante: neste caso, o gráfico da média mostrará eventualmente pontos acima e abaixo da faixa de controle e, o gráfico da amplitude, pontos acima da faixa de controle.

### 3.2.3 Observações

- a) A ocorrência de um número relativamente grande de pontos iniciais fora da faixa de controle já é um indício de que o processo de medição não está sob controle estatístico. Neste caso, a eliminação dos pontos fora de controle pode não ser o procedimento adequado para se estabelecerem os limites de controle para os resultados subsequentes. Se o desvio padrão, avaliado com base em todos os resultados individuais, atender aos requisitos de precisão especificados, ele poderá ser provisoriamente adotado como base de cálculo dos limites de controle, até que se investiguem e se eliminem as causas da perturbação;
- b) A marcação dos pontos no gráfico de controle, à medida que são obtidos, deve ser complementada pela anotação de todos os eventos que possam influir no processamento dos dosímetros: manutenção do equipamento, troca de componentes, recalibração, substituição dos banhos de revelação, de interrupção e de fixação, modificações introduzidas no procedimento, etc.

## 3.3 Inspeção por Amostragem

### 3.3.1 Colocação do problema

A intercomparação periódica de resultados obtidos por um determinado método com os obtidos por métodos alternativos ou

por outros laboratórios é um dos procedimentos correntemente utilizados para controle da exatidão. Esta metodologia de controle requer, obviamente, um tratamento estatístico dos dados obtidos na intercomparação, para verificar se as discrepâncias observadas são ou não estatisticamente significativas.

Como foi mencionado em 2.5, são utilizados no CDTN dois métodos de avaliação de doses individuais:

- dosimetria fotográfica utilizada em rotina;
- dosimetria termoluminescente, de maior sensibilidade e exatidão, utilizada de forma eventual.

Nestas condições, é possível estabelecer, nos moldes de uma inspeção por amostragem, uma sistemática para controle da exatidão dos resultados de dose produzidos em rotina, em se comparando os resultados obtidos por filmes dosimétricos com os obtidos por dosímetros termoluminescentes.

### 3.3.2 Metodologia proposta

Para cada entidade controlada, seleciona-se um certo número de usuários (cerca de 10%), aos quais serão distribuídos os dois tipos de dosímetros. A escolha de tais usuários é feita de forma a refletir os diferentes campos de radiação existentes nos locais de trabalho da entidade.

Após o uso dos dosímetros assim distribuídos, estes são processados, paralelamente, pelo Laboratório de Dosimetria Fotográfica e pelo Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do CDTN.

O tratamento dos dados assim obtidos é feito de acordo com a seguinte metodologia [08]:

a) Variável de controle

$$Z = x/y$$

onde:

x - exposição obtida através do filme dosimétrico;

y - exposição obtida através do dosímetro termoluminescente.

b) Hipóteses básicas

Para uma determinada exposição, avaliada pelos dois tipos de dosímetros, admite-se que:

x - variável normal de média  $\mu_x$  e desvio padrão  $\sigma_x$ ;

y - variável normal de média  $\mu_y$  e desvio padrão  $\sigma_y$ .

$\mu = \frac{\mu_x}{\mu_y}$  - fator de tendenciosidade relativa (dosimetria por filme/dosimetria por TLD)

c) Função de freqüência da variável de controle Z (quociente de duas variáveis normais) [10]

$$\phi(Z) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \frac{C_y^2 Z + C_x^2 \mu}{(C_y^2 Z^2 + C_x^2 \mu^2)^{3/2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(Z - \mu)^2}{C_y^2 Z^2 + C_x^2 \mu^2} \right]$$

onde:

$C_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x}$  = desvio padrão relativo associado à dosimetria por filme.

$C_y = \frac{\sigma_y}{\mu_y}$  = desvio padrão relativo associado à dosimetria por TLD

( $C_x$  e  $C_y$  são determinados experimentalmente para diversas faixas de exposição).

d) Limites de controle da variável Z

Os limites de controle para cada faixa de exposição são calculados com base nas seguintes equações:

- Limite superior de controle (LSC)

$$\Pr (Z > LSC | \mu = 1) = \frac{\alpha}{2} = 5\%$$

- Limite inferior de controle (LIC)

$$\Pr (Z < LIC | \mu = 1) = \frac{\alpha}{2} = 5\%$$

ou seja:

$$\Pr (LIC \leq Z \leq LSC | \mu = 1) = 1 - \alpha = 90\%$$

Com base nas propriedades da distribuição do quociente de 2 variáveis normais, obtêm-se:

$$LIC = \frac{1}{1 - g_y} \left[ 1 - 1,645 \sqrt{C_x^2 (1 - g_y) + C_y^2} \right] \quad (3.1)$$

$$LSC = \frac{1}{1 - g_y} \left[ 1 + 1,645 \sqrt{C_x^2 (1 - g_y) + C_y^2} \right] \quad (3.2)$$

onde:

$$g_y = (1,645 C_y)^2$$

e) Interpretação estatística dos limites de controle

Dentro da hipótese de que não existe tendenciosidade relativa ( $\mu = 1$ ), espera-se que a proporção dos valores de Z



fora da faixa de controle (LIC, LSC) não ultrapasse 10%.

f) Análise dos resultados e ações corretivas

À medida que são obtidos, os valores experimentais da variável  $Z$  são confrontados com os limites de controle da correspondente faixa de exposição. A ocorrência de qualquer ponto fora da faixa de controle é uma indicação da interferência de uma causa identificável de variação, que deve ser, portanto, investigada.

Dentre as possíveis causas identificáveis de variação "assinalável" dos resultados ( $x$  ou  $y$ ), cabe mencionar:

- Variações "assinaláveis" na revelação dos filmes (variações na qualidade dos reagentes, temperatura dos banhos, tempos de permanência do filme na cuba de revelação, no banho de interrupção ou lavagem intermediária, na cuba de fixação, na cuba de lavagem final etc);
- Erros sistemáticos de leitura (densitômetros e leitoras descalibrados, leitura feita sobre manchas na emulsão fotográfica), erros de cálculo e de transcrição, erros na avaliação da energia efetiva etc);
- Erros na calibração de dosímetros com fontes padrões (medida das distâncias fonte-dosímetros e do tempo de irradiação, espalhamento da radiação provocado por paredes, tetos e pisos etc);
- Variações "assinaláveis" no tratamento térmico dos dosímetros termoluminescentes;
- Alteração das condições operacionais dos dispositivos de leitura.

### 3.3.3 Observação

Ao final de um determinado período de controle (em geral, um mês), a média ( $\bar{Z}$ ) dos valores observados da variável  $Z$  reflete o valor médio do fator de tendenciosidade  $\mu$ . Se este valor não for compatível com os requisitos de exatidão, investigações devem ser feitas no sentido de identificar e eliminar as causas da tendenciosidade observada.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Dispositivos Utilizados

Para a coleta dos dados experimentais necessários à implantação da sistemática de controle proposta, utilizou-se o Laboratório de Calibração de Instrumentos e Dosímetros Individuais do CDTN. Este laboratório, com dimensões de 8,8 X 5,6 m, está aparelhado com uma mesa de calibração, fontes padrões de Ra-226, Cs-137 e Co-60, dosímetro "Farmer" 2502/3, suportes para irradiação, dosímetros fotográficos e termoluminescentes. Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais características dos equipamentos utilizados.

Para irradiação de dosímetros em condições controladas, eles são posicionados seqüencialmente, num arranjo radial com relação à fonte padrão (Figura 4.1). Este arranjo é conhecido como espiral de calibração. Desta forma, a irradiação de dosímetros a diferentes distâncias da fonte permite obter simultaneamente diferentes valores de exposição.

Após selecionar a fonte padrão, de natureza e atividade conhecidas, determinam-se as distâncias fonte-dosímetro para as exposições desejadas, ao longo de um tempo de irradiação prefixado. Considerando a fonte como puntiforme, a distância fonte-dosímetro pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$d = \left( \frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{X} \right)^{1/2}$$

Tabela 4.1 - Características Principais dos Equipamentos Utilizados pelo Serviço de Dosimetria Individual do CDTN

EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	CARACTERÍSTICAS
Dosímetro FARMER Tipo 2502/3	1	Dosímetro de precisão para raios X e radiação $\gamma$ . Po de ser usado como padrão terciário. Possui câmaras de ionização de 0,6 cm <sup>3</sup> e 0,3 cm <sup>3</sup> , podendo ser usa do para dosimetria, da faixa de 10 kV até a faixa de MV (ou MeV).
Dosímetro FARMER Tipo 2502	1	Dosímetro de precisão para raios X e radiação $\gamma$ . Po de ser usado como padrão terciário. Possui câmaras de ionização de 0,6 cm <sup>3</sup> e 0,3 cm <sup>3</sup> , podendo ser usa do para dosimetria, da faixa de 10 kV até a faixa de MV (ou MeV).
Máquina de Revelação	1	Equipamento semi-automático para revelação de fil mes dosimétricos. Contém 5 cubas para revelação. Possui dispositivo que permite a homogeneização constante dos banhos.
Densitômetro Repro-master Tipo Rm 21	2	Densitômetro digital para medições por transparên cia ou por reflexão.
Máquina de Soldagem de Plásticos	1	Máquina para fabricação de envelopes plásticos pa ra acondicionamento e proteção dos dosímetros con tra agentes ambientais.
Geladeira	2	Geladeira comercial comum.
Unidade de Leitura de TLD	3	2 unidades de leitura para "chips", fabricação Harshaw, modelo 3000. Unidade de leitura para bulbos, fabricação Harshaw, modelo 2000.
Registrador	2	Registrador gráfico, fabricação Bausch & Lomb , modelo Omnigraphic X- $\gamma$ Recorder.
Forno	1	Forno tipo mufla, fabricação Blue M, modelo M10A-1A.



FIG. 4.1 - ARRANJO UTILIZADO PARA IRRADIAÇÕES CONTROLADAS DE  
DOSÍMETROS INDIVIDUAIS

$d$  = distância fonte-dosímetro (m)

$\Gamma$  = constante específica de radiação gama, característica do tipo de fonte padrão ( $R.m^2. Ci^{-1}.h^{-1}$ )

$A$  = atividade da fonte padrão (Ci)

$X$  = exposição desejada (R)

$t$  = tempo de irradiação (h)

Para uma fonte real (não puntiforme), esta equação é tanto mais aproximada quanto maior for a razão  $d/L$ , onde  $L$  é a maior dimensão linear da fonte.

## 4.2 Gráficos de Controle

### 4.2.1 Irradiação dos dosímetros de controle

A técnica dos gráficos de controle foi aplicada para controle estatístico da dosimetria fotográfica (filmes Kodak-Tipo 1 e Agfa Gevaert) e da dosimetria termoluminescente (TLD-200 e TLD-700). De acordo com a metodologia proposta, para cada tipo de dosímetro, foram realizadas 25 irradiações controladas (mesma exposição), abrangendo 4 dosímetros de controle por irradiação. Para o TLD-700 foi realizada uma segunda série de irradiações, após reparação<sup>1</sup> da unidade de leitura.

Após cada irradiação, os dosímetros de controle foram processados para obtenção das leituras de densidade ótica, no caso dos filmes, ou de corrente integrada, no caso dos dosímetros termoluminescentes.

O valor de exposição escolhido para irradiação de todos os dosímetros de controle foi de 100 mR, por ser este um valor representativo da exposição média recebida pelos trabalhadores

---

<sup>1</sup>Conforme mencionado na pag. 79, verificou-se que a unidade de leitura apresentava defeito.

das diversas unidades do Grupo Nuclebrás, durante os períodos de integração adotados (1 ou 3 meses, conforme a unidade controlada).

#### 4.2.2 Resultados obtidos

Os resultados de densidade ótica líquida obtidos para os filmes de controle (Kodak e Agfa) e os de corrente integrada, para os dosímetros de controle termoluminescentes (TLD-200 e TLD-700) são apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Os gráficos de controle correspondentes são mostrados nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

Os resultados apresentados na Tabela 4.6 e o gráfico de controle da Figura 4.6 referem-se ao 2º levantamento realizado com o dosímetro TLD-700, após o reparo da unidade de leitura.

Tabela 4.2 - Resultados de Densidade Ótica Obtidos com Filme Kodak, Tipo 1

Exposição: 100 mR

Fonte: Ra-226

Leitura: Faixa sem filtração (1ª emulsão)

SUBGRUPO	DATA	LEITURA ( $DO_1$ )				MÉDIA ( $\bar{x}_i$ )	AMPLITUDE (R)
		$x_i$	$x_i'$	$x_i''$	$x_i'''$		
01	09/07/82	0,40	0,39	0,40	0,38	0,39	0,02
02	15/07/82	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,01
03	22/07/82	0,48	0,48	0,47	0,47	0,48	0,01
04	29/07/82	0,41	0,47	0,42	0,43	0,43	0,06
05	10/08/82	0,55	0,52	0,53	0,55	0,54	0,03
06	11/08/82	0,48	0,47	0,49	0,49	0,48	0,02
07	12/08/82	0,56	0,57	0,57	0,60	0,58	0,04
08	13/08/82	0,55	0,52	0,53	0,54	0,54	0,03
09	19/08/92	0,47	0,50	0,45	0,42	0,46	0,08
10	23/08/82	0,52	0,52	0,52	0,54	0,53	0,02
11	24/08/82	0,42	0,42	0,44	0,42	0,43	0,02
12	25/08/82	0,42	0,42	0,42	0,37	0,41	0,05
13	30/08/82	0,47	0,46	0,44	0,49	0,47	0,05
14	31/08/82	0,46	0,43	0,46	0,49	0,46	0,06
15	01/09/82	0,48	0,48	0,54	0,45	0,49	0,09
16	09/09/82	0,43	0,57	0,51	0,52	0,51	0,14
17	10/09/82	0,53	0,39	0,40	0,46	0,45	0,14
18	13/09/82	0,51	0,51	0,51	0,47	0,50	0,04
19	14/09/82	0,46	0,45	0,45	0,46	0,46	0,01
20	17/09/82	0,44	0,56	0,57	0,57	0,54	0,13
21	20/09/82	0,48	0,48	0,45	0,45	0,47	0,03
22	21/09/82	0,48	0,48	0,47	0,47	0,48	0,02
23	22/09/82	0,46	0,42	0,41	0,46	0,44	0,05
24	23/09/82	0,40	0,36	0,35	0,37	0,37	0,05
25	24/09/82	0,38	0,42	0,52	0,47	0,45	0,14
						$\Sigma \bar{x}_i = 11,78$	$\Sigma R = 1,34$

$$\bar{x} = \frac{11,78}{25} = 0,47$$

$$LSC = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 0,51$$

$$LIC = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 0,43$$

$$\bar{R} = \frac{1,34}{25} = 0,054$$

$$LSC = D_4 \bar{R} = 0,12$$

$$LIC = D_3 \bar{R} = 0$$



Tabela 4.3 - Resultados de Densidade Ótica Obtidos com o Filme Agfa Gevaert

Exposição: 100 mR

Fonte: Co-60

Leitura: Faixa sem filtração (1ª emulsão)

SUBGRUPO	DATA	LEITURA ( $DO_1$ )				MÉDIA ( $\bar{x}_i$ )	AMPLITUDE (R)
		$x_i$	$x_i'$	$x_i''$	$x_i'''$		
01	09/09/83	0,20	0,20	0,21	0,20	0,203	0,01
02	19/09/83	0,21	0,21	0,22	0,22	0,215	0,01
03	22/09/83	0,19	0,19	0,20	0,20	0,195	0,01
04	26/09/83	0,20	0,20	0,20	0,19	0,198	0,01
05	28/09/83	0,17	0,17	0,17	0,17	0,170	0,00
06	05/10/83	0,20	0,20	0,20	0,20	0,200	0,00
07	06/10/83	0,22	0,20	0,20	0,20	0,205	0,02
08	07/10/83	0,20	0,20	0,21	0,21	0,205	0,01
09	10/10/83	0,19	0,20	0,21	0,20	0,200	0,02
10	11/10/83	0,22	0,22	0,21	0,21	0,215	0,01
11	17/10/83	0,20	0,20	0,21	0,21	0,205	0,01
12	18/10/83	0,21	0,20	0,21	0,21	0,208	0,01
13	19/10/83	0,22	0,21	0,22	0,22	0,218	0,01
14	20/10/83	0,21	0,21	0,21	0,21	0,210	0,00
15	24/10/83	0,21	0,21	0,21	0,22	0,213	0,01
16	25/10/83	0,23	0,23	0,22	0,23	0,228	0,01
17	26/10/83	0,18	0,19	0,18	0,18	0,183	0,01
18	27/10/83	0,20	0,20	0,20	0,20	0,200	0,00
19	03/11/83	0,18	0,18	0,17	0,18	0,178	0,01
20	04/11/83	0,18	0,18	0,18	0,18	0,180	0,00
21	07/11/83	0,20	0,21	0,20	0,20	0,203	0,01
22	16/11/83	0,19	0,19	0,18	0,19	0,188	0,01
23	17/11/83	0,19	0,20	0,20	0,19	0,195	0,01
24	21/11/83	0,18	0,19	0,19	0,19	0,188	0,01
25	22/11/83	0,19	0,19	0,18	0,19	0,188	0,01
						$\Sigma \bar{x}_i = 4,991$	$\Sigma R = 0,220$

$$\bar{x} = \frac{4,991}{25} = 0,200$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{LSC} = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 0,21 \\ \text{LIC} = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 0,19 \end{array} \right.$$

$$\bar{R} = \frac{0,220}{25} = 0,009$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{LSC} = D_4 \bar{R} = 0,021 \\ \text{LIC} = D_3 \bar{R} = 0 \end{array} \right.$$

Tabela 4.4 - Resultados de Corrente Integrada Obtidos com o TLD-200 (CaF<sub>2</sub>)

Exposição: 100 mR  
Fonte: Ra-226

SUBGRUPO	DATA	LEITURA (nC)				MÉDIA ( $\bar{x}_i$ )	AMPLITUDE (R)
		$x_i$	$x_i'$	$x_i''$	$x_i'''$		
01	20/10/82	101,3	95,0	98,6	111,3	101,55	16,3
02	21/10/82	108,4	116,3	99,8	113,4	109,48	16,5
03	22/10/82	95,1	100,5	96,2	108,1	99,98	13,0
04	27/10/82	99,8	101,6	95,0	106,3	100,68	11,3
05	03/11/82	99,5	103,9	87,6	109,5	100,13	21,9
06	04/11/82	95,7	101,8	90,0	110,4	99,48	20,4
07	05/11/82	95,6	94,4	94,1	104,3	97,10	10,2
08	08/11/82	94,1	105,8	94,7	100,3	98,73	11,7
09	10/11/82	100,8	109,3	91,6	111,6	103,33	20,0
10	11/11/82	98,5	109,6	92,7	110,6	102,85	17,9
11	12/11/82	110,8	110,6	93,3	113,1	106,95	19,8
12	16/11/82	100,3	111,4	92,9	114,7	104,83	21,8
13	17/11/82	106,7	117,7	104,5	121,2	112,53	16,7
14	18/11/82	113,3	114,7	102,7	113,9	111,15	12,0
15	19/11/82	105,0	113,0	99,8	117,0	108,70	17,2
16	24/11/82	101,4	110,6	95,9	103,2	102,78	14,7
17	25/11/82	104,1	111,8	94,2	112,9	105,75	18,7
18	26/11/82	101,6	111,3	97,4	105,1	103,85	13,9
19	29/11/82	97,9	106,3	89,4	110,2	100,95	20,8
20	30/11/82	101,4	112,4	103,9	112,0	107,43	11,0
21	01/12/82	104,3	112,2	101,9	115,1	108,37	13,2
22	02/12/82	103,9	114,5	105,5	106,0	107,47	10,6
23	03/12/82	100,5	111,2	102,3	110,3	106,07	10,7
24	06/12/82	105,1	114,9	96,3	114,8	107,78	18,6
25	07/12/82	107,0	111,1	102,6	113,7	108,60	11,1
						$\Sigma \bar{x}_i = 2616,52$	$\Sigma R = 390,0$

$$\bar{x} = \frac{2616,52}{25} = 104,7$$

$$\bar{R} = \frac{390,0}{25} = 15,6$$

$$\begin{cases} \text{LSC} = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 116,0 \\ \text{LIC} = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 93,2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{LSC} = D_4 \bar{R} = 35,6 \\ \text{LIC} = D_3 \bar{R} = 0 \end{cases}$$

Tabela 4.5 - Resultados de Corrente Integrada Obtidos com o TLD-700 (LiF)-1º levantamento

Exposição: 100 mR  
Fonte: Ra-226

SUBGRUPO	DATA	LEITURA (nC)				MÉDIA ( $\bar{x}_i$ )	AMPLITUDE (R)
		$x_i$	$x_i'$	$x_i''$	$x_i'''$		
01	05/10/82	0,695	0,684	0,671	0,671	0,68	0,024
02	07/10/82	0,738	0,655	0,669	0,718	0,70	0,083
03	14/10/82	0,825	0,805	0,778	0,807	0,80	0,047
04	15/10/82	0,586	0,721	0,665	0,663	0,68	0,058
05	18/10/82	0,670	0,690	0,670	0,656	0,67	0,034
06	20/10/82	0,625	0,633	0,592	0,598	0,61	0,041
07	21/10/82	0,741	0,694	0,673	0,663	0,69	0,078
08	22/10/82	0,614	0,601	0,587	0,585	0,60	0,029
09	27/10/82	0,806	0,768	0,756	0,793	0,78	0,050
10	28/10/82	0,825	0,751	0,789	0,739	0,78	0,086
11	03/11/82	0,805	0,794	0,704	0,719	0,76	0,101
12	04/11/82	0,706	0,669	0,624	0,696	0,67	0,082
13	05/11/83	0,720	0,730	0,714	0,736	0,73	0,022
14	08/11/82	0,684	0,648	0,684	0,645	0,67	0,039
15	10/11/82	0,782	0,771	0,785	0,726	0,77	0,059
16	11/11/82	0,692	0,691	0,659	0,673	0,68	0,033
17	12/11/82	0,707	0,778	0,608	0,704	0,70	0,170
18	16/11/82	0,607	0,582	0,539	0,502	0,56	0,105
19	17/11/82	0,650	0,573	0,571	0,673	0,62	0,102
20	18/11/82	0,637	0,609	0,600	0,631	0,62	0,037
21	19/11/82	0,589	0,547	0,524	0,533	0,55	0,065
22	24/11/82	0,600	0,598	0,562	0,596	0,59	0,038
23	25/11/82	0,632	0,589	0,567	0,611	0,60	0,065
24	26/11/82	0,546	0,518	0,508	0,522	0,52	0,038
25	30/11/82	0,697	0,687	0,689	0,664	0,68	0,033
						$\Sigma \bar{x}_i = 16,71$	$\Sigma R = 1,52$

$$\bar{x} = \frac{16,71}{25} = 0,67$$

$$\bar{R} = \frac{1,52}{25} = 0,061$$

$$\begin{cases} \text{LSC} = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 0,71 \\ \text{LIC} = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 0,63 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{LSC} = D_4 \bar{R} = 0,14 \\ \text{LIC} = D_3 \bar{R} = 0 \end{cases}$$

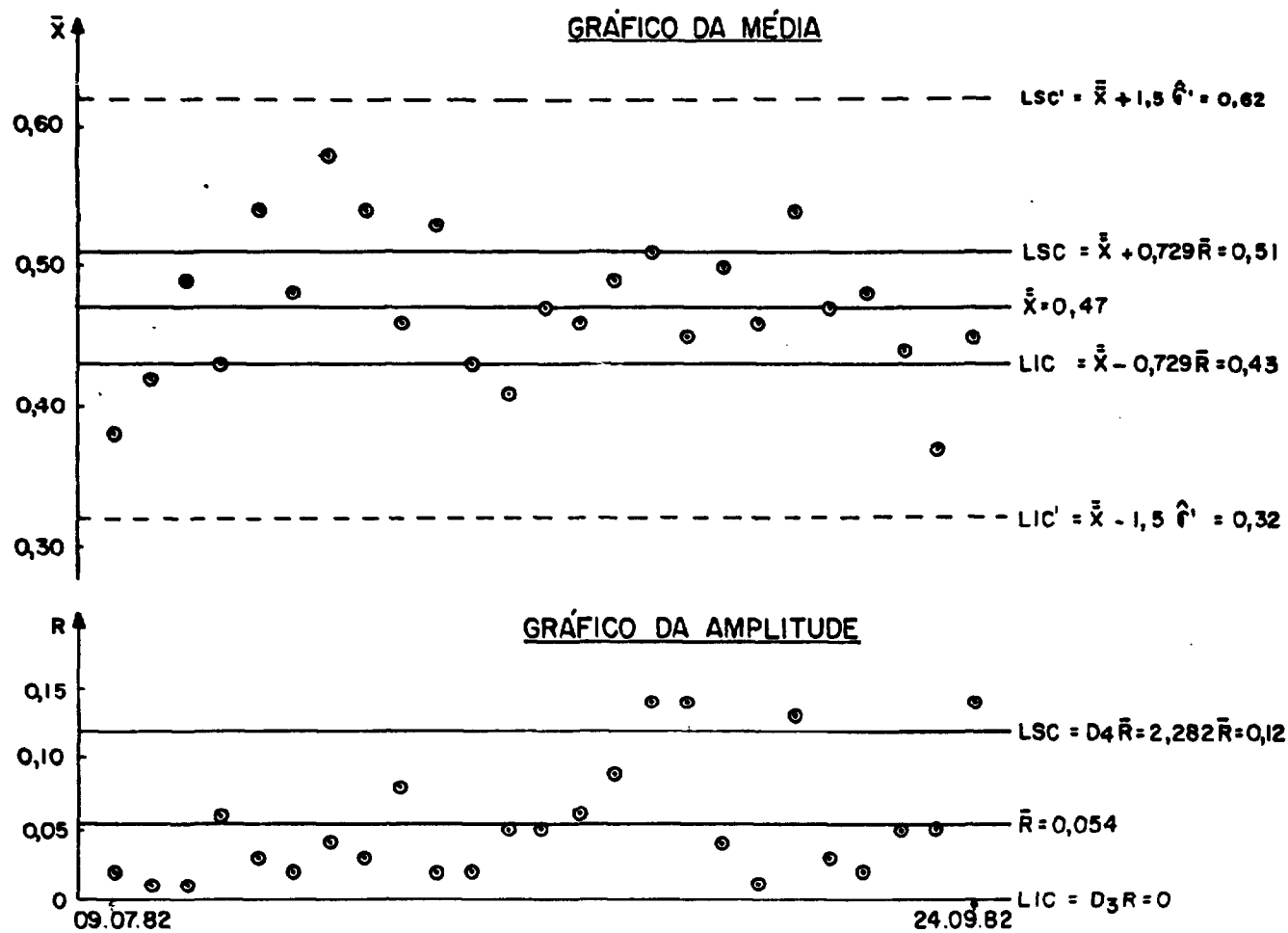


FIG. 4.2 - GRÁFICOS DE CONTROLE DO FILME KODAK-TIPO 1 (100mR)

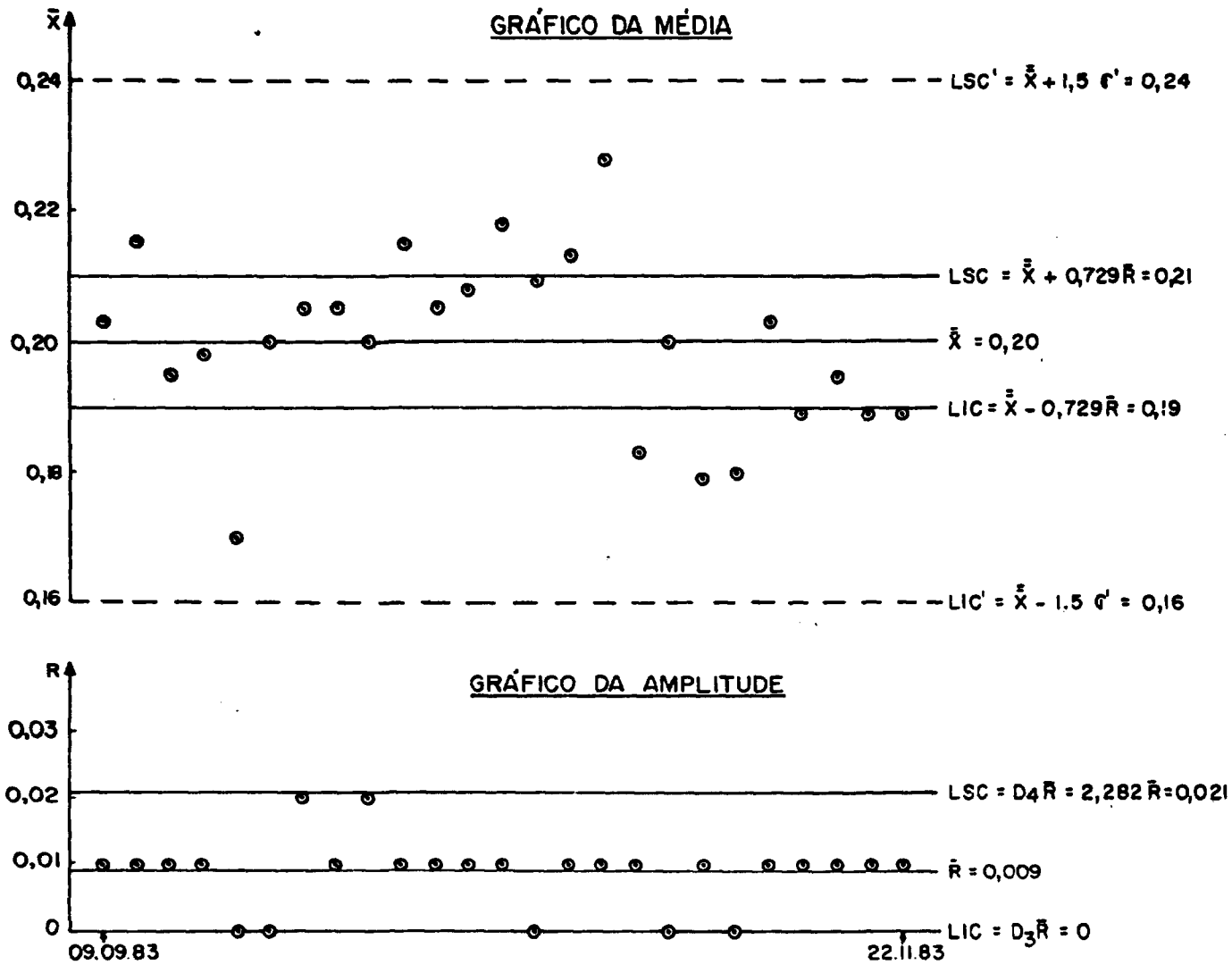


FIG. 4.3.-GRÁFICOS DE CONTROLE DO FILME AGFA GEVAERT (100mR)

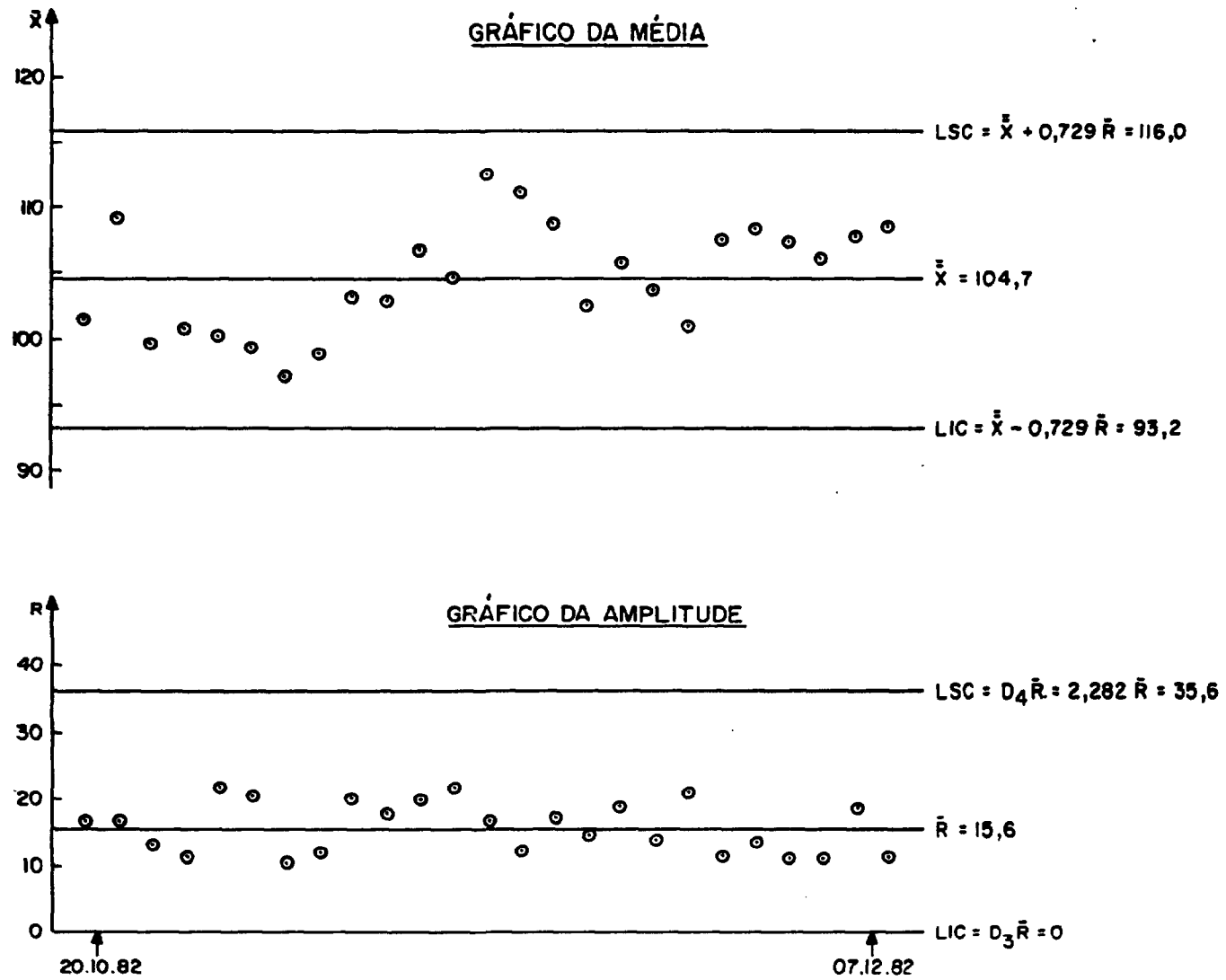


FIG. 4.4 - GRÁFICOS DE CONTROLE DO TLD - 200 (100 mR)

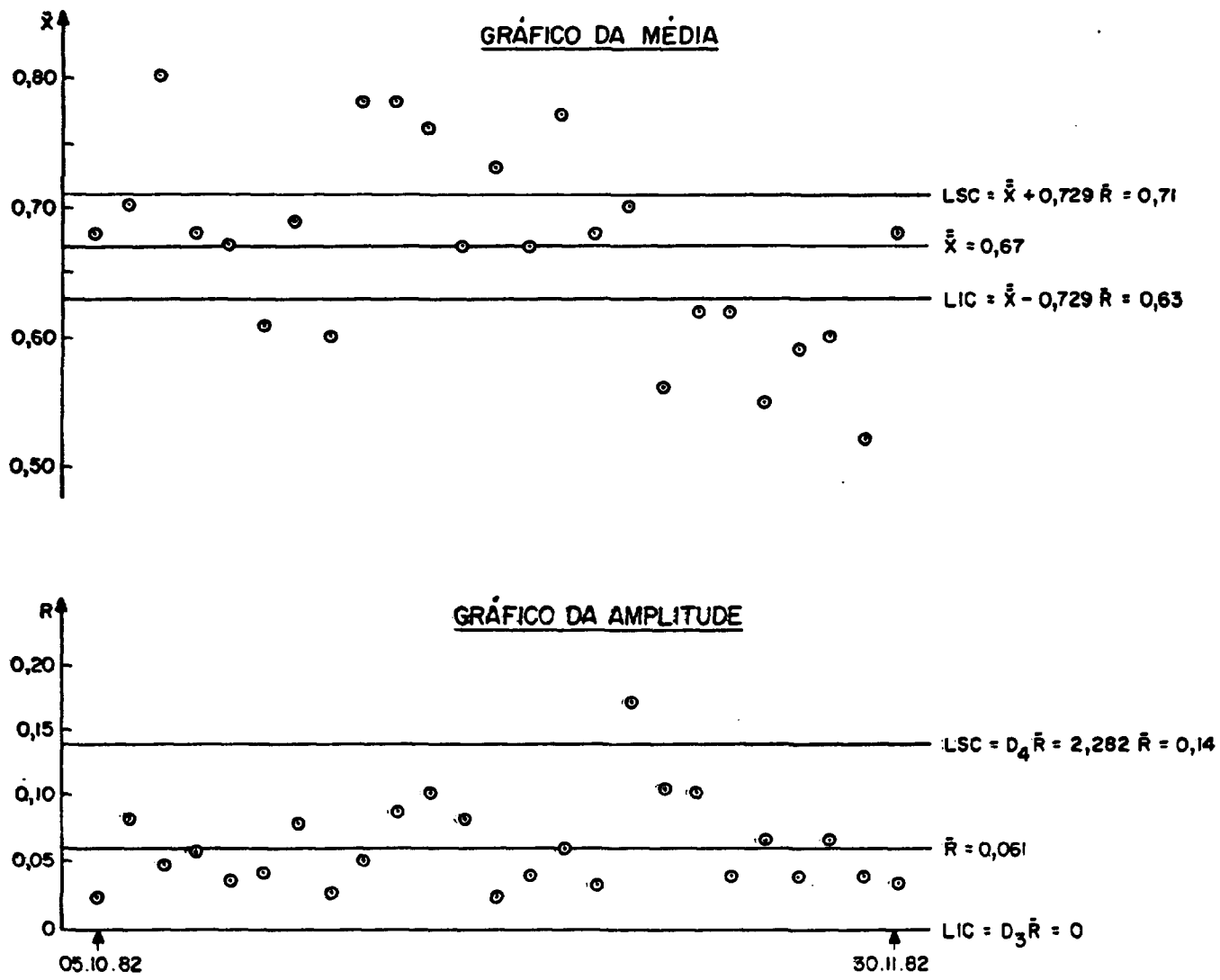


FIG. 4.5 - GRÁFICOS DE CONTROLE DO TLD-700 (100 mR, Ra-226)

Tabela 4.6 - Resultados de Corrente Integrada Obtidos com o TLD-700 (LiF) - 2º levantamento

Exposição: 100 mR  
Fonte: Co-60

SUBGRUPO	DATA	LEITURA (nC)				MÉDIA ( $\bar{x}_i$ )	AMPLITUDE (R)
		$x_i$	$x_i'$	$x_i''$	$x_i'''$		
01	22/09/83	0,342	0,340	0,336	0,329	0,337	0,013
02	26/09/83	0,327	0,321	0,322	0,299	0,317	0,028
03	28/09/83	0,321	0,304	0,322	0,327	0,319	0,023
04	05/10/83	0,344	0,326	0,332	0,366	0,342	0,040
05	06/10/83	0,352	0,370	0,349	0,351	0,356	0,021
06	07/10/83	0,355	0,323	0,310	0,324	0,328	0,045
07	10/10/83	0,358	0,336	0,319	0,302	0,329	0,056
08	11/10/83	0,323	0,324	0,303	0,355	0,326	0,052
09	17/10/83	0,328	0,319	0,356	0,319	0,331	0,037
10	18/10/83	0,328	0,294	0,343	0,352	0,329	0,058
11	19/10/83	0,316	0,303	0,333	0,341	0,323	0,038
12	20/10/83	0,335	0,363	0,344	0,328	0,343	0,035
13	26/10/83	0,357	0,358	0,382	0,373	0,368	0,025
14	27/10/83	0,355	0,347	0,327	0,340	0,342	0,028
15	03/11/83	0,368	0,374	0,392	0,368	0,376	0,024
16	04/11/83	0,383	0,379	0,348	0,373	0,371	0,035
17	07/11/83	0,336	0,319	0,421	0,373	0,362	0,102
18	08/11/83	0,368	0,355	0,338	0,352	0,353	0,030
19	09/11/83	0,353	0,342	0,395	0,364	0,364	0,053
20	16/11/83	0,379	0,383	0,397	0,369	0,382	0,028
21	17/11/83	0,354	0,385	0,357	0,348	0,361	0,037
22	21/11/83	0,353	0,381	0,372	0,358	0,366	0,028
23	22/11/83	0,386	0,383	0,376	0,327	0,368	0,059
24	24/11/83	0,342	0,372	0,357	0,360	0,358	0,030
25	28/11/83	0,374	0,378	0,367	0,374	0,373	0,011
						$\Sigma \bar{x}_i = 8,724$	$\Sigma R = 0,936$

$$\bar{x} = \frac{8,724}{25} = 0,35$$

$$\bar{R} = \frac{0,936}{25} = 0,037$$

$$\begin{cases} \text{LSC} = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 0,38 \\ \text{LIC} = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 0,32 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{LSC} = D_4 \bar{R} = 0,084 \\ \text{LIC} = D_3 \bar{R} = 0 \end{cases}$$



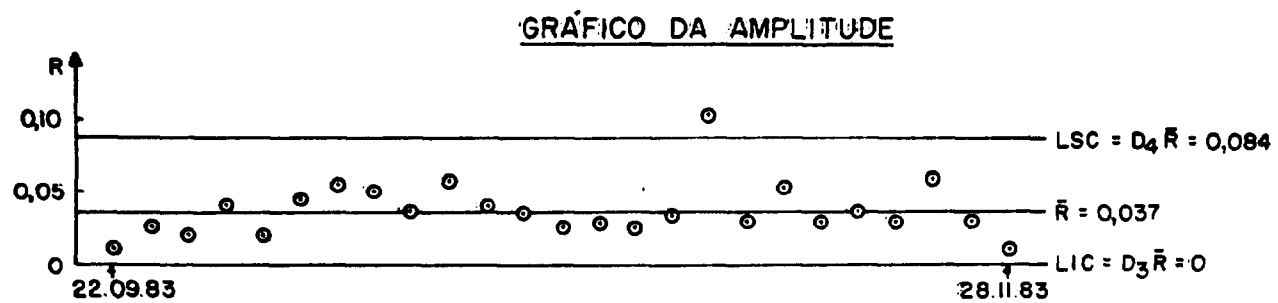
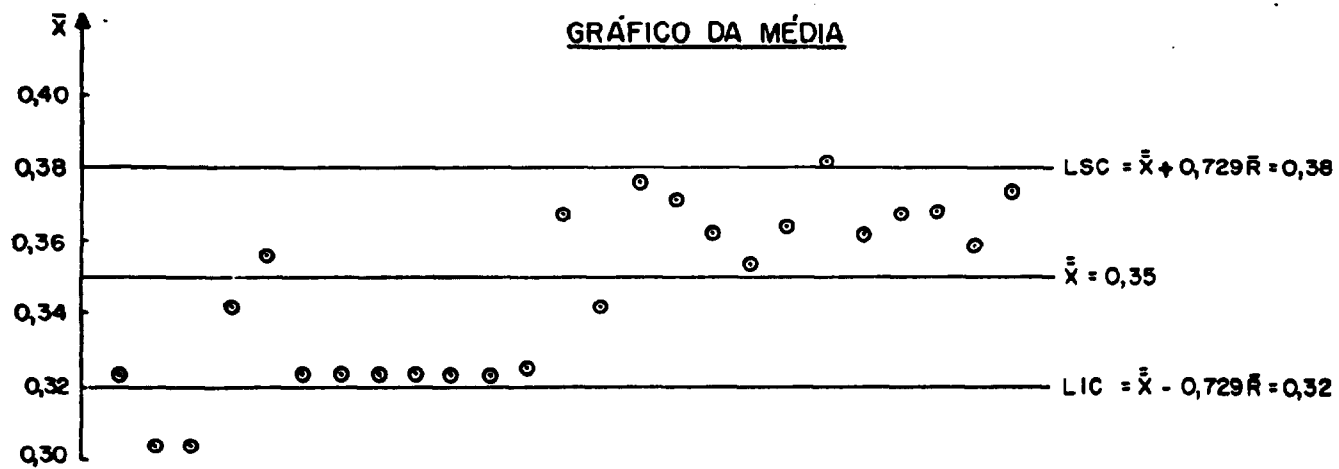


FIG. 4.6-GRÁFICOS DE CONTROLE DO TLD-700 (100mR, CO-60)

### 4.2.3 Análise dos resultados

#### 4.2.3.1 Filme Kodak - Tipo 1

##### a) Gráfico da amplitude

O gráfico da amplitude mostra que a dispersão das leituras nos diversos subgrupos está razoavelmente sob controle estatístico (4 pontos se situam ligeiramente acima do limite superior de controle).

A estimativa do desvio padrão ( $\sigma$ ), calculada com base na amplitude média ( $\bar{R}$ ), é:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = 0,4857\bar{R} = 0,026$$

o que corresponde a um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}/\bar{x}$ ) de apenas 5,5%.

Este resultado denota que o procedimento de medição adotado no CDTN tem, potencialmente, uma capacidade de gerar resultados com um alto grau de reprodutibilidade (para esta faixa de exposição, a CNEM admite que o erro relativo na determinação da dose possa ser de até 20% [06]).

##### b) Gráfico da média

No gráfico da média, foram observados 9 pontos fora da faixa de controle (5 acima e 4 abaixo). Considerando que a dispersão se manteve razoavelmente sob controle, este resultado denota a ocorrência de variações significativas da média  $\mu$ , ao longo da rotina atualmente seguida, ou seja, uma indicação de que existem causas identificáveis que estão provocando deslocamento da média ideal  $\mu$ , ora num sentido, ora no outro.

Assim, para que o processo de medição pudesse ter realmente o grau de reprodutibilidade indicado pelo gráfico da amplitude, seria necessário identificar essas causas e introduzir modificações no processo, de modo a eliminá-las.

Com base na dispersão entre os resultados das 25 médias obtidas, pode-se calcular a estimativa do desvio padrão global de todos os resultados:

$$\hat{\sigma}' = 2 \hat{\sigma}_{\bar{x}} = 2 \left[ \frac{1}{N-1} \sum_1^N (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 \right]^{1/2} = 2 \left[ \frac{\sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{24} \right]^{1/2} =$$

$$\hat{\sigma}' = 0,101$$

ou seja, um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}'/\bar{\bar{x}}$ ) de cerca de 20%.

Se este desvio padrão  $\hat{\sigma}'$  for adotado para cálculo dos limites de controle do gráfico da média (corresponde a considerar como incontroláveis as causas identificáveis de variação entre subgrupos), obtém-se:

$$\begin{cases} \text{LIC}' = \bar{\bar{x}} - 1,5 \hat{\sigma}' = 0,32 \\ \text{LSC}' = \bar{\bar{x}} + 1,5 \hat{\sigma}' = 0,62 \end{cases}$$

Para estes novos limites de controle, todos os pontos caem na faixa de controle.

Em resumo, os gráficos de controle referentes aos filmes Kodak - Tipo 1 mostram que o processo de medição não se encontra a rigor sob controle, denotando deslocamentos significativos da média  $\mu$  entre subgrupos. Todavia, as variações observadas se situam ainda dentro de limites aceitáveis, em vista da especificação. Deve-se observar, no entanto, que se as causas identificáveis de variação forem eliminadas, a capacidade do

processo, em termos de reprodutibilidade, poderá ser substancialmente melhorada.

#### 4.2.3.2 Filme Agfa Gevaert

##### a) Gráfico da amplitude

Pelo gráfico da amplitude, pode-se observar que a dispersão nas leituras se encontra sob controle.

O desvio padrão  $\sigma$  estimado com base na amplitude média ( $\bar{R}$ ) é:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = 0,4857 \bar{R} = 0,0044$$

o que corresponde a um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}/\bar{x}$ ) da ordem de 2%.

Analogamente ao filme Kodak, o procedimento de medição adotado tem, potencialmente, uma capacidade de gerar resultados com alto grau de reprodutibilidade.

##### b) Gráfico da média

No gráfico da média, foram observados 12 pontos fora da faixa de controle (5 acima e 7 abaixo). Considerando que a dispersão está sob controle, esta irregularidade indica, como no caso anterior, deslocamentos significativos da média  $\mu$ , ao longo da rotina atualmente seguida.

Para que o procedimento de medição utilizado possa alcançar o grau de reprodutibilidade indicado pelo gráfico da amplitude, seria necessário identificar as causas de perturbação e introduzir modificações no processamento, de modo a eliminá-las.

O desvio padrão calculado com base na dispersão entre as médias é:

$$\hat{\sigma}' = 2\hat{\sigma}_{\bar{x}} = 2 \left[ \frac{\sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{24} \right]^{1/2} = 0,028$$

o que corresponde a um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}'/\bar{\bar{x}}$ ) de 14%.

Adotando-se este desvio padrão  $\hat{\sigma}'$  para cálculo dos limites de controle do gráfico da média, obtém-se:

$$\begin{cases} \text{LIC}' = \bar{\bar{x}} - 1,5 \hat{\sigma}' = 0,16 \\ \text{LSC}' = \bar{\bar{x}} + 1,5 \hat{\sigma}' = 0,24 \end{cases}$$

Para estes novos limites de controle, todos os pontos caem na faixa de controle.

Em resumo, os gráficos de controle referentes aos filmes Agfa Gevaert mostram, como no caso anterior, que o processo de medição não se encontra a rigor sob controle. As variações observadas se situam, contudo, dentro de limites aceitáveis, em vista da especificação. A diferença entre a média (0,20) e a leitura individual mais discrepante (0,17) é, em valor relativo, de apenas 15%.

#### 4.2.3.3 TLD - 200

##### a) Gráfico da amplitude

Pelo gráfico da amplitude, pode-se observar que a dispersão nas leituras está rigorosamente sob controle.

A estimativa do desvio padrão  $\sigma$  com base na amplitude média ( $\bar{R}$ ) é:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = 0,4857\bar{R} = 7,6$$

o que corresponde a um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}/\bar{x}$ ) da ordem de 7,0%.

#### b) Gráfico da média

No gráfico da média, todos os 25 pontos caíram dentro da faixa de controle. Observa-se, no entanto, a ocorrência de duas seqüências de pontos de um mesmo lado da linha central (uma seqüência de 8 pontos, no início da metade inferior da faixa de controle e uma seqüência de 6 pontos, no final da metade superior da faixa de controle). Esta ocorrência indica um possível deslocamento da média  $\mu$  ao longo do tempo, embora de pouca amplitude.

A estimativa do desvio padrão  $\sigma$  com base na dispersão entre as médias é:

$$\hat{\sigma}' = 2\hat{\sigma}_{\bar{x}} = 2 \left[ \frac{\sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{24} \right]^{1/2} = 8,3$$

Este valor está em boa concordância com a estimativa de  $\sigma$ , calculada a partir da amplitude média.

Assim, os gráficos de controle referentes ao TLD-200 mostram que tanto a dispersão quanto a média estão sob controle estatístico. Seria recomendável, entretanto, investigar as causas da irregularidade acima apontada.

#### 4.2.3.4 TLD-700 (1º levantamento)

##### a) Gráfico da amplitude

Pelo gráfico da amplitude, observa-se que um único ponto ultrapassou a faixa de controle. Assim, pode-se considerar sob controle a dispersão entre as leituras nos diversos subgrupos.

O desvio padrão  $\sigma$  estimado com base na amplitude média ( $\bar{R}$ ) é:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = 0,4857\bar{R} = 0,030$$

ou seja, um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}/\bar{x}$ ) de 4,5%.

#### b) Gráfico da média

No gráfico da média, foram observados 15 pontos fora da faixa de controle (6 acima e 9 abaixo da faixa de controle). Considerando que a dispersão está sob controle, esta irregularidade indica deslocamentos significativos da média  $\mu$  ao longo do tempo.

A causa de tais deslocamentos foi investigada, constatando-se defeito num componente (Triac 40527) da unidade de leitura (Harshaw Modelo 3000). Este componente é o responsável pelo controle da corrente de aquecimento da bandeja que aloja o dosímetro durante a leitura.

O desvio padrão calculado com base na dispersão entre as médias é:

$$\hat{\sigma}' = 2\hat{\sigma}_{\bar{x}} = 2 \left[ \frac{\sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{24} \right]^{1/2} = 0,15$$

o que corresponde a um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}'/\bar{x}$ ) da ordem de 23% .

A discrepância entre as duas estimativas (fator de 5) é mais uma evidência de que as leituras não apresentam as características de uma variabilidade normal.

#### 4.2.3.5 TLD - 700 (2º levantamento, após reparo da leitora)

##### a) Gráfico da amplitude

Pelo gráfico da amplitude, observa-se que um único ponto ultrapassou a faixa de controle. Assim, pode-se considerar sob controle a dispersão entre as leituras nos diversos subgrupos.

O desvio padrão  $\sigma$  estimado com base na amplitude média ( $\bar{R}$ ) é:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = 0,4857\bar{R} = 0,018$$

ou seja, um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}/\bar{x}$ ) da ordem de 5%.

##### b) Gráfico da média

No gráfico da média, foram observados 3 pontos fora da faixa de controle (2 abaixo e 1 acima). Considerando a dispersão sob controle, esta irregularidade, conjugada com a constatação de duas seqüências de pontos de um mesmo lado da linha central indica deslocamento da média  $\mu$  ao longo do tempo (os primeiros pontos deslocam a média para baixo da linha central e os últimos deslocam a média para cima da linha central).

O desvio padrão calculado com base na dispersão entre as médias é:



$$\hat{\sigma}' = 2\hat{\sigma}_{\bar{x}} = 2 \left[ \frac{\sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{24} \right]^{1/2} = 0,040$$

o que corresponde a um desvio padrão relativo ( $\hat{\sigma}'/\bar{\bar{x}}$ ) de cerca de 11%. As duas estimativas de  $\sigma$  diferem por um fator da ordem de 2.

Em resumo, os gráficos de controle referentes ao TLD-700, obtidos após a reparação da leitora, indicam uma melhoria sensível das características de reprodutibilidade dos resultados. Não obstante, é recomendável que se façam novas investigações para identificar as causas das irregularidades constatadas.

### 4.3 Inspeção por Amostragem

#### 4.3.1 Procedimento experimental

A técnica da inspeção por amostragem, conforme a metodologia proposta, foi aplicada para controle dos resultados de dose indicados por filmes dosimétricos, distribuídos a usuários de duas entidades controladas (designadas por A e B). Usuários selecionados destas duas entidades receberam no mesmo suporte o filme dosimétrico Agfa e o TLD-700. Na entidade A, foram feitas 4 distribuições sucessivas destes suportes e, na entidade B, 3 distribuições.

Para fins de controle, a metodologia foi também aplicada a pares de dosímetros irradiados em laboratório, sob condições controladas.

Para aplicação da metodologia, foi necessário avaliar previamente os desvios padrões relativos associados à dosimetria fotográfica ( $C_x$ ) e à dosimetria termoluminescente ( $C_y$ ), em diversas faixas de exposição. Para este fim, foram selecionados 4 valo

res de exposição, representativos de 4 faixas de exposição, e para cada valor de exposição selecionado, foram irradiados 15 pares de dosímetros (filme Agfa e TLD-700). As faixas selecionadas e os valores de exposição nas irradiações foram:

- . Faixa I (20 a 80 mR) - irradiação a 50 mR;
- . Faixa II (80 a 300 mR) - irradiação a 190 mR;
- . Faixa III (300 a 800 mR) - irradiação a 550 mR;
- . Faixa IV (acima de 800 mR) - irradiação a 1000 mR.

#### 4.3.2 Resultados obtidos

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados de exposição obtidos com os filmes Agfa (x) e com os TLD-700 (y) para as irradiações realizadas em 50, 190, 550 e 1000 mR. A tabela inclui também os valores calculados dos desvios padrões relativos e dos limites de controle aplicáveis a cada faixa de exposição.

Os valores obtidos na intercomparação dos resultados de exposição com o filme (x) e com TLD (y), nas entidades controladas A e B, são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9, respectivamente. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram graficamente os resultados da variável de controle  $Z = x/y$ , em confronto com os limites de controle estabelecidos.

Os valores obtidos na intercomparação de resultados de exposição com filme e com TLD, em condições controladas, são apresentados na Tabela 4.10. A Figura 4.9 mostra o gráfico obtido para a variável de controle Z.

Tabela 4.7 - Resultados Obtidos para Determinação de Desvios Padrões Relativos

a) Faixa I (20 mR < X ≤ 80 mR): irradiação em 50mR

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)	
	TLD - 700 (y)	AGFA GEVAERT (x)
01	57	47
02	54	47
03	58	58
04	56	41
05	58	58
06	54	45
07	48	45
08	52	45
09	57	50
10	47	50
11	55	42
12	53	55
13	52	55
14	52	51
15	53	51
MÉDIA	$\bar{y} = 53,7$	$\bar{x} = 49,3$
DESVIO PADRÃO (s)	$s_y = 3,3$	$s_x = 5,4$

$$\left[ \begin{array}{l} C_x = \frac{s_x}{\bar{x}} = 11,0\% \\ C_y = \frac{s_y}{\bar{y}} = 6,1\% \end{array} \right.$$

Limites de controle da variável  $Z = x/y$  (equações 3.1 e 3.2):

$$\left[ \begin{array}{l} LIC = 0,79 \\ LSC = 1,21 \end{array} \right.$$

b) Faixa II ( $80 \text{ mR} < X \leq 300 \text{ mR}$ ): irradiação em 190 mR

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)	
	TLD - 700 (y)	AGFA GEVAERT (x)
16	202	185
17	210	175
18	208	180
19	211	193
20	203	193
21	218	175
22	185	175
23	205	175
24	205	175
25	211	185
26	180	193
27	193	189
28	186	189
29	182	189
30	184	198
MÉDIA	$\bar{y} = 198,9$	$\bar{x} = 184,6$
DESVIO PADRÃO (s)	$s_y = 12,6$	$s_x = 8,2$

$$\left[ \begin{array}{l} C_x = \frac{s_x}{\bar{x}} = 4,4\% \\ C_y = \frac{s_y}{\bar{y}} = 6,3\% \end{array} \right.$$

Limites de controle da variável  $Z = x/y$ :

$$\left[ \begin{array}{l} LIC = 0,93 \\ LSC = 1,07 \end{array} \right.$$

c) Faixa III (300 mR < X ≤ 800 mR): irradiação em 550 mR

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)	
	TIP 700 (y)	AGFA GEVAERT (x)
31	591	499
32	534	450
33	635	499
34	568	446
35	661	512
36	553	450
37	589	495
38	591	454
39	646	517
40	550	446
41	536	550
42	555	564
43	554	548
44	549	556
45	545	560
MÉDIA	$\bar{y} = 577,1$	$\bar{x} = 503,0$
DESVIO PADRÃO (s)	$s_y = 40,9$	$s_x = 45,4$

$$\left[ \begin{array}{l} C_x = \frac{s_x}{\bar{x}} = 9,0\% \\ C_y = \frac{s_y}{\bar{y}} = 7,1\% \end{array} \right.$$

Limites de controle da variável  $Z = x/y$ :

$$\left[ \begin{array}{l} LIC = 0,81 \\ LSC = 1,19 \end{array} \right.$$

d) Faixa IV ( $X > 800$  mR) : irradiação em 1000 mR

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)	
	TLD - 700 (y)	AGFA GEVAERT (x)
46	1 166	956
47	1 033	854
48	1 146	939
49	1 159	939
50	1 319	943
51	972	833
52	1 073	943
53	1 025	819
54	1 111	837
55	1 134	833
56	1 009	1 018
57	987	1 035
58	1 005	960
59	1 002	948
60	992	987
MÉDIA	$\bar{y} = 1.075,5$	$\bar{x} = 922,9$
DESVIO PADRÃO (s)	$s_y = 95,9$	$s_x = 70,3$

$$\left[ \begin{array}{l} C_x = \frac{s_x}{\bar{x}} = 7,6\% \\ C_y = \frac{s_y}{\bar{y}} = 8,9\% \end{array} \right.$$

Limites de controle da variável  $Z = x/y$ :

$$\left[ \begin{array}{l} LIC = 0,81 \\ LSC = 1,19 \end{array} \right.$$

Tabela 4.8 - Intercomparação de Resultados de Exposição Obtidos por Filmes Dosimétricos Agfa Gevaert (AG) e TLD-700 - Entidade A

a) 1ª Distribuição

. Faixa I ( $20 \text{ mR} < X \leq 80 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
197	16	20	1,25
275	16	20	1,25
119	17	20	1,18
098	18	20	1,11
175	19	30	1,58
198	23	20	0,87
295	23	30	1,30
286	25	40	1,60
205	29	40	1,38
053	32	20	0,63
085	40	40	1,00
069	48	30	0,63
413	49	80	1,63
162	53	50	0,94
268	54	50	0,93
024	56	40	0,71
040	56	70	1,25
279	56	70	1,25
218	61	70	1,15
237	64	70	1,09
343	79	100	1,27

. Faixa II ( $80 \text{ mR} < X \leq 300 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
236	81	90	1,11
381	103	100	0,97
039	168	170	1,01

## b) 2ª Distribuição

. Faixa I ( $20 \text{ mR} < X \leq 80 \text{ mR}$ )

NÚMERO DE SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
119	21	20	0,95
069	25	20	0,80
205	28	20	0,71
061	37	30	0,81
053	49	60	1,22
413	54	60	1,11
268	55	60	1,09
040	60	70	1,17

. Faixa II ( $80 \text{ mR} < X \leq 300 \text{ mR}$ )

NÚMERO DE SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
063	81	90	1,11
236	82	80	0,98
237	84	80	0,95
295	91	80	0,88
343	91	90	0,99
039	122	130	1,07
381	261	240	0,92



## c) 3ª Distribuição

. Faixa I ( $20 \text{ mR} < X \leq 80 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
069	24	20	0,83
119	24	20	0,83
162	55	20	0,36
218	57	30	0,53
040	71	50	0,70
039	72	60	0,83
413	74	70	0,95
268	76	60	0,79

. Faixa II ( $80 \text{ mR} < X \leq 300 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
237	90	90	1,0
295	92	70	0,76
343	118	110	0,93
236	121	120	0,99
063	141	120	0,85
279	246	190	0,77

## d) 4ª Distribuição

. Faixa I ( $20 \text{ mR} < X \leq 80 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
119	21	20	0,95
069	23	20	0,87
205	40	30	0,75
098	50	40	0,80
268	69	60	0,87
218	69	50	0,72
162	73	50	0,68
039	74	70	0,95
036	78	70	0,90

. Faixa II ( $80 \text{ mR} < X \leq 300 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
413	84	90	1,07
295	90	70	0,78
237	95	90	0,95
343	136	120	0,88
063	158	120	0,76

Tabela 4.9 - Intercomparação de Resultados de Exposição Obtidos por Filmes Dosimétricos Agfa Gevaert (AG) e TLD-700 - Entidade B

a) 1ª Distribuição

. Faixa I (20 mR < X ≤ 80 mR)

NÚMERO DE SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
093	47	40	0,85
057	49	40	0,82
209	51	30	0,59
128	53	40	0,75
143	60	60	1,00
147	60	50	0,83
127	64	70	1,09
121	68	50	0,74
098	70	50	0,71
171	73	80	1,10
163	73	70	0,96
169	77	70	0,91
157	77	70	0,91
074	79	70	0,89
154	80	80	1,00

. Faixa II (80 mR < X ≤ 300 mR)

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
160	82	70	0,85
050	82	70	0,85
026	83	60	0,72
001	87	80	0,92
107	88	70	0,80
124	88	90	1,02
039	89	80	0,90
095	95	100	1,05
091	97	110	1,13
030	99	100	1,01
046	110	90	0,82
053	231	170	0,74
029	299	180	0,60

## b) 2ª Distribuição

. Faixa I (20 mR &lt; X ≤ 80 mR)

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
218	57	40	0,70
278	57	60	1,05
039	60	30	0,50
093	60	20	0,33
147	71	50	0,70
213	71	30	0,42
095	71	30	0,42
026	77	60	0,78

. Faixa II (80 mR &lt; X ≤ 300 mR)

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
157	85	60	0,71
001	88	100	1,14
143	90	70	0,78
148	93	80	0,86
155	97	90	0,93
053	97	90	0,93
121	99	60	0,61
160	102	90	0,88
091	105	90	0,86
169	128	120	0,94
035	135	110	0,81
046	140	130	0,93
124	142	130	0,92
279	145	150	1,03
074	155	130	0,84
265	157	190	1,21
098	158	130	0,82

## c) 3ª Distribuição

. Faixa I ( $20 \text{ mR} < X \leq 80 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
093	28	20	0,71
148	41	30	0,73
127	45	30	0,67
218	48	30	0,63
163	48	30	0,63
115	48	50	1,04
057	52	20	0,38
171	56	60	1,07
278	59	40	0,68
213	60	30	0,50
157	62	50	0,81
128	62	50	0,81
001	64	50	0,78
121	65	30	0,46
091	65	70	1,08
050	66	50	0,76
143	66	50	0,96
026	72	20	0,28
233	73	70	0,96
124	78	90	1,15
169	80	70	0,88

. Faixa II ( $80 \text{ mR} < X \leq 300 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	EXPOSIÇÃO (mR)		Z = x/y
	TLD (y)	AG (x)	
279	81	60	0,74
030	84	80	0,95
147	86	70	0,81
074	87	80	0,92
095	87	90	1,03
098	87	80	0,92
046	92	80	0,87
107	108	80	0,74
053	122	110	0,90
265	128	150	1,17
160	154	50	0,32

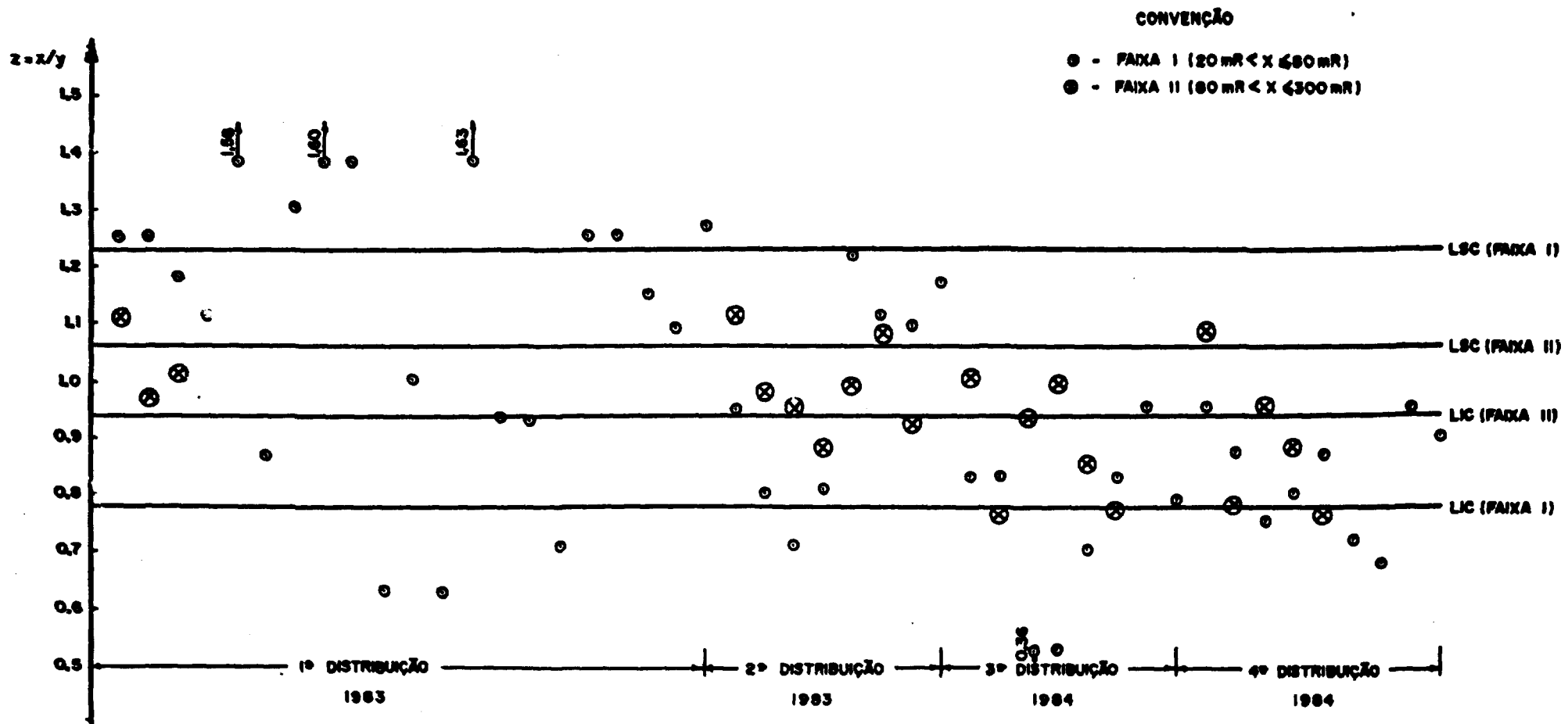


FIG. 4.7 - GRÁFICO DA INSPEÇÃO POR AMOSTRAGEM PARA A ENTIDADE "A"

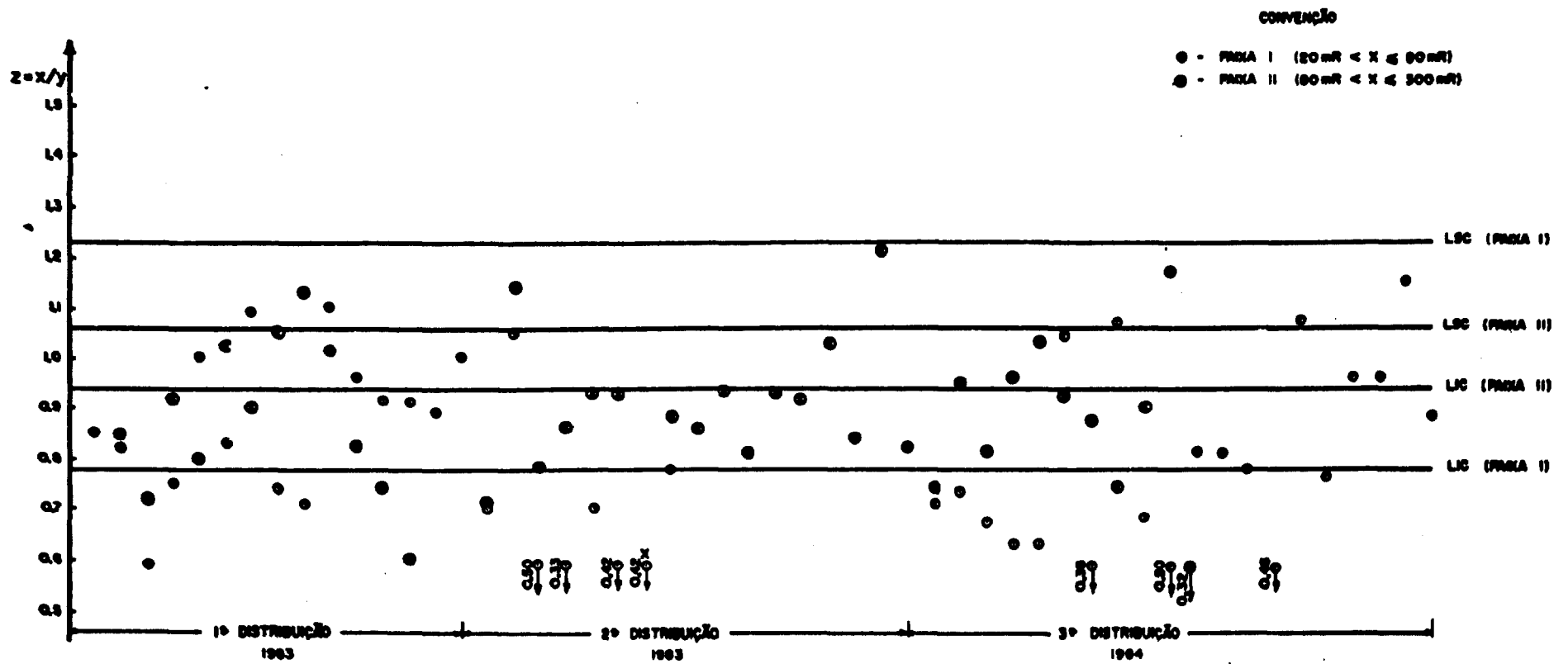


FIG. 4.8 - GRÁFICO DA INSPEÇÃO POR AMOSTRAGEM PARA A ENTIDADE "B"

**Tabela 4.10 - Intercomparação de Resultados de Exposição  
Obtidos por Filmes Agfa Gevaert (AG) e TLD-700  
em Condições Controladas (Laboratório de Cali  
bração).**

Fonte: Co-60

a) Faixa I ( $20 \text{ mR} < X \leq 80 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	DATA DA IRRADIAÇÃO	EXPOSIÇÃO (mR)			Z = x/y
		PREVISTA	OBTIDA		
			TLD (y)	AG (x)	
24	24/04/84	30	28	39	1,39
25			30	45	1,50
32	09/05/84	60	56	62	1,11
33			58	68	1,17
40	04/06/84		61	69	1,13
41			64	75	1,17
01	29/02/84		64	68	1,06
02			69	74	1,07
09	14/03/84	76	75	85	1,13
10			79	89	1,13



## b) Faixa II (80 mR &lt; X ≤ 300 mR)

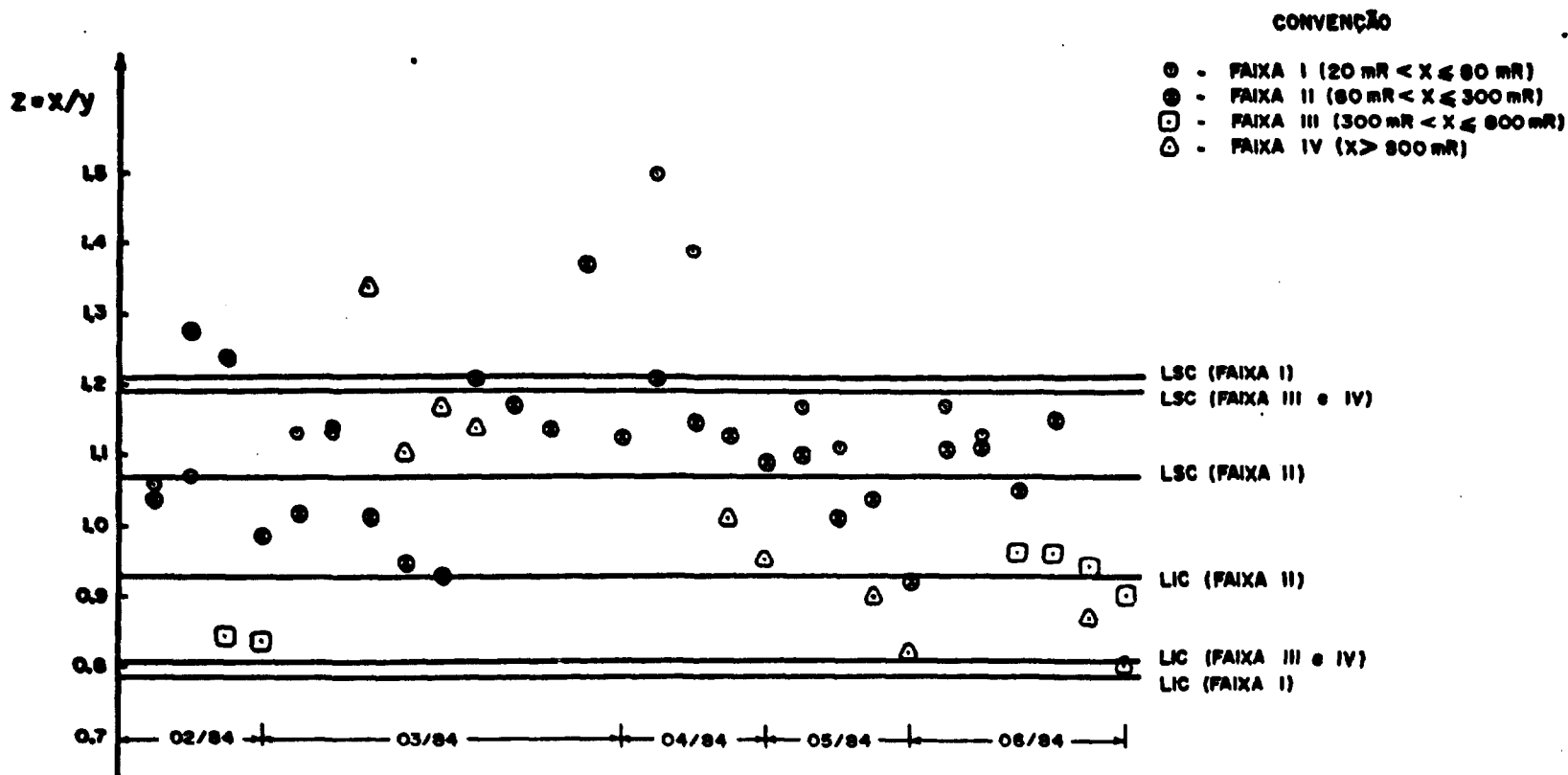
NÚMERO DO SUPORTE	DATA DA IRRADIAÇÃO	EXPOSIÇÃO (mR)			Z = x/y
		PREVISTA	OBTIDA		
			TLD (y)	AG (x)	
11	21/03/84	90	92	111	1,21
12			95	111	1,17
03	29/02/84	100	96	100	1,04
04			97	124	1,28
13	14/03/84		98	100	1,02
14	21/03/84		98	112	1,14
15	14/03/84		99	100	1,01
16			99	94	0,95
17	21/03/84		99	136	1,37
05	29/02/84		100	124	1,24
42			101	112	1,11
43	04/06/84		101	106	1,05
44			101	112	1,11
18	14/03/84		101	94	0,93
06	29/02/84		101	100	0,99
34	09/05/84		102	112	1,10
45	04/06/84		103	118	1,15
19	21/03/84		104	118	1,13
35	09/05/84		105	106	1,01
26	24/04/84		107	130	1,21
27			108	124	1,15
36	09/05/84		108	112	1,04
37		109	100	0,92	
28	24/04/84	110	124	1,13	
29		114	124	1,09	

c) Faixa III ( $300 \text{ mR} < X \leq 800 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	DATA DA IRRADIAÇÃO	EXPOSIÇÃO (mR)			Z = x/y
		PREVISTA	TLD (y)	AG (x)	
46	08/06/84	430	439	384	0,87
47			476	380	0,80
48	04/06/84	450	475	458	0,96
49			477	458	0,96
07	29/02/84	600	687	580	0,84
08			717	593	0,83

d) Faixa IV ( $X > 800 \text{ mR}$ )

NÚMERO DO SUPORTE	DATA DA IRRADIAÇÃO	EXPOSIÇÃO (mR)			Z = x/y
		PREVISTA	TLD (y)	AG (x)	
20	14/03/84	900	731	980	1,34
21			922	1 015	1,10
30	24/04/84		974	980	1,01
38	09/05/84		988	893	0,90
31	24/04/84		1 081	1 024	0,95
39	09/05/84		1 144	937	0,82
50	08/06/84		1 000	1 049	985
51		1 085		976	0,90
22	21/03/84	1 300	1 428	1 676	1,17
23			1 470	1 676	1,14



**FIG. 4.9 GRÁFICO DA INSPEÇÃO POR AMOSTRAGEM EM IRRADIAÇÕES CONTROLADAS**

### 4.3.3 Análise dos resultados

#### 4.3.3.1 Entidade A

O gráfico da inspeção por amostragem (Figura 4.7) indica, em linhas gerais, uma proporção considerável de pontos fora das faixas de controle: cerca de 40% dos pontos fora da faixa I e cerca de 50% fora da faixa II.

Na 1ª distribuição de dosímetros, observa-se uma tendência de superestimação dos resultados do filme dosimétrico com relação aos do TLD: cerca de 50% dos pontos da 1ª distribuição caíram acima da faixa de controle e apenas cerca de 10% abaixo. Esta tendência se inverte na 3ª e 4ª distribuições de dosímetros, onde cerca de 40% dos pontos caíram abaixo da faixa e apenas um ponto (3%) acima.

#### 4.3.3.2 Entidade B

O gráfico da inspeção por amostragem (Figura 4.8) indica igualmente uma proporção considerável de pontos fora das faixas de controle: cerca de 50% dos pontos fora da faixa I e cerca de 80% fora da faixa II.

Nas três distribuições de dosímetros, observa-se uma tendência nítida de subestimação dos resultados do filme com relação aos do TLD: cerca de 60% dos pontos caíram abaixo da faixa de controle e apenas cerca de 5% acima.

### 4.3.4 Irradiações controladas

Com o propósito de verificar em laboratório possíveis ocorrências de tendenciosidade das medidas de exposição por filme

com relação às medidas por TLD, foi realizada no período de fevereiro a junho de 1984 uma série de irradiações controladas de pares de dosímetros, abrangendo 11 valores de exposições conhecidas, de 30 até 1300 mR.

Aos resultados assim obtidos (Tabela 4.10), foi aplicada a mesma metodologia da inspeção por amostragem. O gráfico da variável de controle Z é mostrado na Figura 4.9.

Pelos resultados apresentados na Tabela 4.10, verifica-se uma tendência nítida dos resultados por filme superestimarem os valores previstos de exposição, nas faixas I e II. Na faixa III, esta situação se inverte, observando-se uma tendência do TLD superestimar os valores previstos de exposição. Na faixa IV, não há qualquer tendência nítida. Estas constatações se refletem igualmente no gráfico da Figura 4.9. Não obstante as tendenciosidades constatadas, observa-se que somente os pontos da faixa II se situam predominantemente fora da faixa de controle correspondente. Tal ocorrência pode ser atribuída a uma possível subestimação do desvio padrão relativo associado à dosimetria fotográfica na faixa II ( $C_x = 4,4\%$ ).

Por outro lado, estes testes de laboratório não confirmam a tendenciosidade observada nos gráficos da inspeção por amostragem das entidades A e B, que mostraram uma predominância de pontos abaixo das faixas de controle I e II. Cabe observar, no entanto, que durante a execução dos testes de laboratório, foram detectados, e posteriormente reparados, defeitos nos controladores de temperatura utilizados para tratamento térmico dos dosímetros termoluminescentes.

As tendenciosidades relativas constatadas na inspeção por amostragem das entidades A e B poderiam ser ainda causadas por erro na avaliação da energia efetiva da radiação gama que provocou a exposição. Esta causa possível de tendenciosidade deverá ser investigada.

## 5. CONCLUSÕES

A sistemática para controle da qualidade de Serviços de Dosimetria Individual, proposta neste trabalho, é de fácil aplicação e atende ao Programa de Garantia da Qualidade, mencionado no documento "Serviço de Monitoração Individual Externa por Filmes Dosimétricos do CDTN/NUCLEBRÁS", encaminhado à CNEN e revisto periodicamente.

Ficou comprovado pela aplicação da técnica dos gráficos de controle que o Serviço de Dosimetria Fotográfica do CDTN tem, potencialmente, capacidade de gerar resultados de dose individual com um alto grau de reprodutibilidade. Entretanto, para que o grau de reprodutibilidade observado com os resultados de um mesmo subgrupo possa ser identificado com a precisão real do procedimento de medição, será necessário introduzir alterações no procedimento, de forma a eliminar as causas das significativas flutuações da média ao longo do tempo.

A seguir são apresentadas, de forma resumida, as principais conclusões específicas a que se chegou com a aplicação das técnicas de controle implantadas:

.Os gráficos de controle para o TLD-200 ( $CaF_2$ ) indicam que o procedimento de medição se encontra sob controle estatístico. A precisão dos resultados, em termos de desvio padrão relativo, é da ordem de 10% para a exposição de 100 mR.

.O gráfico da média para o TLD-700 (LiF) apresentou, no levantamento, flutuações significativas dos resultados ao longo do tempo. Tendo-se identificado um defeito na unidade de leitura, o gráfico da média, obtido após reparação do defeito, apresentou ainda alguma irregularidade, indicando, no entanto, uma melhoria sensível na reprodutibilidade dos resultados. O desvio padrão relativo, estimado com base na dis

persão das médias, é também da ordem de 10%.

.Os gráficos de controle para os filmes dosimétricos (Kodak e Agfa) indicaram que o procedimento de medição de doses com filmes não se encontra, a rigor, sob controle estatístico. To davia, as flutuações observadas no gráfico da média se si tuam dentro de limites aceitáveis, em face da especificação. No caso do filme Agfa, que é o filme atualmente utilizado pe lo CDTN, o desvio padrão relativo, estimado com base na dis persão das médias, é da ordem de 14%.

A introdução de procedimentos mais rigorosos para controle das condições de processamento dos filmes poderá propiciar me lhorias sensíveis no grau de reprodutibilidade dos resultados.

.A aplicação da técnica de inspeção por amostragem para contro le dos resultados de dose em duas entidades controladas mos trou uma tendenciosidade relativa que, em geral, denota sube stimação dos resultados por filme com relação ao resultados por TLD. Testes realizados em laboratório não confirmaram es ta tendenciosidade. Durante a realização destes testes, cons tatou-se, no entanto, a ocorrência de problemas com os contro ladores de temperatura dos fornos utilizados para tratamento térmico dos dosímetros termoluminescentes.

O prosseguimento da aplicação da sistemática proposta permiti rá identificar as causas de interferência responsáveis pelas irregularidades observadas e introduzir as modificações neces sárias para corrigir tais irregularidades.

APÊNDICE I - Tabelas para Cálculo dos Limites de Controle.



Tabela I.1 - Fatores para Cálculo dos Limites em Gráficos de Controle (Sistema Norte Americano).

Tamanho da amostra	Gráfico da média			Gráfico da amplitude						Gráfico do desvio-padrão					
	Limites de controle			Linha média		Limites de controle				Linha média		Limites de Controle			
	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	c <sub>2</sub>	1/c <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
2	2,121	3,760	1,880	1,128	0,853	0	3,686	0	3,267	0,5642	1,7725	0	1,843	0	3,267
3	1,732	2,394	1,023	1,693	0,888	0	4,358	0	2,575	0,7236	1,3820	0	1,858	0	2,568
4	1,500	1,880	0,729	2,059	0,880	0	4,698	0	2,282	0,7979	1,2533	0	1,808	0	2,266
5	1,342	1,596	0,577	2,326	0,864	0	4,918	0	2,115	0,8407	1,1894	0	1,756	0	2,089
6	1,225	1,410	0,483	2,534	0,848	0	5,078	0	2,004	0,8686	1,1512	0,026	1,711	0,030	1,970
7	1,134	1,277	0,419	2,704	0,833	0,205	5,203	0,076	1,924	0,8882	1,1259	0,205	1,672	0,118	1,882
8	1,061	1,175	0,373	2,847	0,820	0,387	5,307	0,136	1,864	0,9027	1,1078	0,167	1,638	0,185	1,815
9	1,000	1,094	0,337	2,970	0,808	0,546	5,394	0,184	1,816	0,9139	1,0942	0,219	1,609	0,239	1,761
10	0,949	1,028	0,308	3,078	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777	0,9227	1,0837	0,262	1,584	0,284	1,716

(Reprodução da Tabela apresentada na Referência [7])

**Tabela I.2 - Fórmulas para Cálculo dos Limites em Gráficos de Controle**

Gráfico de Controle da	Norma conhecida		Norma desconhecida	
	Linha Média	Limites de Controle	Linha Média	Limites de Controle
Média, por $\sigma$ ....	$\mu$	$\mu \pm A.\sigma$	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} \pm A_1.\bar{s}$
Média, por R...	-	-	$\bar{\bar{x}}$	$\bar{\bar{x}} \pm A_2.\bar{R}$
Desvio-padrão...	$c_2.\sigma$	$B_1.\sigma; B_2.\sigma$	$\bar{s}$	$B_3.\bar{s}; B_4.\bar{s}$
Amplitude.....	$d_2.\sigma$	$D_1.\sigma; D_2.\sigma$	$\bar{R}$	$D_3.\bar{R}; D_4.\bar{R}$

(Reprodução da Tabela apresentada na Referência [7])

APÊNDICE II - Formulário para Coleta de Dados.

**COLETA DE DADOS E FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DOS LIMITES DE CONTROLE**

<b>LABORATÓRIO :</b>														<b>LEITURA:</b>																							
<b>DOSÍMETRO :</b>				<b>TIPO :</b>				<b>EXPOSIÇÃO :</b>				<b>ENERGIA :</b>																									
<b>SUB-GRUPO</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>Nº</b>	<b><math>\bar{X}_j</math></b>	<b>R<sub>j</sub></b>	<b>DATA</b>																				
<b>PROC-RI</b>														1																							
														2																							
														3																							
														4																							
	<b>TOTAL</b>														5																						
<b>X-MÉDIA</b>														6																							
<b>R-AMPLITUDE</b>														7																							
<b>SUB-GRUPO</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>		8																							
<b>ARC-RI</b>														9																							
														10																							
														11																							
														12																							
	<b>TOTAL</b>														13																						
<b>X-MÉDIA</b>														14																							
<b>R-AMPLITUDE</b>														15																							
<b>LIMITE PARA GRÁFICO DA MÉDIA</b>							<b>LIMITES PARA GRÁFICO DA AMPLITUDE</b>							16																							
Limite Superior de Controle = $\bar{X} + A_2 \bar{R}$ Limite Inferior de Controle = $\bar{X} - A_2 \bar{R}$							Limite Superior de Controle = $D_4 \bar{R}$ Limite Inferior de Controle = $D_3 \bar{R}$							17																							
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>N</th><th>A<sub>2</sub></th></tr> <tr><td>2</td><td>1,880</td></tr> <tr><td>3</td><td>1,023</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,729</td></tr> </table>							N	A <sub>2</sub>	2	1,880	3	1,023	4	0,729	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>N</th><th>D<sub>4</sub></th><th>D<sub>3</sub></th></tr> <tr><td>2</td><td>3,267</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>2,575</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>2,282</td><td>0</td></tr> </table>							N	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	2	3,267	0	3	2,575	0	4	2,282	0	18			
N	A <sub>2</sub>																																				
2	1,880																																				
3	1,023																																				
4	0,729																																				
N	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>																																			
2	3,267	0																																			
3	2,575	0																																			
4	2,282	0																																			
														19																							
														20																							
														21																							
														22																							
														23																							
														24																							
														25																							
$\bar{X} = \frac{1}{25} \sum_{j=1}^{25} \bar{X}_j$							$\bar{R} = \frac{1}{25} \sum_{j=1}^{25} R_j$							$\bar{X} =$		$\bar{R} =$																					
														T																							

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TUBIANA, M. Les bases biologiques de la radioprotection. Paris, Electricité de France/s.d/.
- [2] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, New York, Pergamon, 1977. (ICRP, 26).
- [3] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation quantities and units. Washington, D.C., 1980 (ICRU, 33).
- [4] KOSLOV, V. F. Photographic dosimetry of ionizing radiations. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1966.
- [5] CHOUDENS, H. de. Dosimétrie. Réglementation et législation. In: COURS DE GÉNIE ATOMIQUE, 1973. lessons... /Grenoble, Commissariat à l'Energie Atomique, C.E.N.G., 1973. Pt.1.
- [6] BRASIL - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Exigências específicas para monitoração individual por meio de filmes radiográficos para radiação gama. Rio de Janeiro/s.d./
- [7] LOURENÇO FILHO, RUI DE C.B. Controle estatístico da qualidade, Rio de Janeiro, Livros técnicos e científicos, 1981. 223 p.
- [8] GOMIDE, P. T.; PINTO, J. M. A. E DI LORENZO R. F. Manual de garantia da qualidade de análises químicas. 3. rev. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1983.

- [9] BOWKER, A. H. AND LIEBERMAN, G. J. Engineering statistics. 2 ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1972.
- [10] KENDAL, M. G. AND STUART, A. The advanced theory of statistics. 2 ed. London. C. Griffin, 1967, V.1.
- [11] BLATZ, H. Introduction to radiological health. New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1964.

**BIBLIOGRAFIA ADICIONAL**

- ATTIX, FRANK H. Topics in radiation dosimetry. New York, Academic Press, 1972. V.2.
- BRASIL - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Autorização para o funcionamento dos laboratórios de serviços de monitoração individual. Rio de Janeiro, 1981 (CNEN-NE-3.04).
- BRASIL - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas básicas de proteção radiológica. Rio de Janeiro, 1973 (CNEN-06/73).
- CAMERON, R.J; SUNTHARALINGAM, N; KENNEY, N.G. Thermoluminescent dosimetry. Clinton, Colonial Press, 1968.
- CAMPOS, MAURÍCIO M. E ANDRADE, JOÃO M. Distribuições de frequência: aplicações no tratamento de resultados de análises. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1981.
- CAMPOS, MAURÍCIO M. Transcrição de resultados de análises químicas. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1983 (ASPC.PD.-001/83).
- CAMPOS, MAURÍCIO M. E PEREIRA, MÁRCIO T. Curso de proteção radiológica. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/IPR/s.d/ (IPR,413).
- CHESTER, O.R. AND GARTEN Jr, T.C. Quality assurance applied to environmental radiological surveillance. Nuclear Safety 21 (2): 217-25, 1980.
- COSTA, JOSÉ R. Princípios básicos da qualidade industrial. Rio de Janeiro, NUCLEBRÁS, 1977, 296 p.
- CUNHA, P.C. E LEÃO J.L.B. Serviço de monitoração pessoal do I.R.D., Rio de Janeiro, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 1980.

DEUS, SUDERNAIQUE F. Estudo comparativo de dosímetros foto-gráficos, termoluminescentes e radiofotoluminescentes. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1971. Tese de mestrado.

EUA. Department of Commerce, National Bureau of Standards. Physical aspects of irradiation. Recommendation of the ICRU. Washington, D.C., NS Government Printing Office, 1964. (ICRU report, 10 b) (NBS handbook, 85).

EUA. Nuclear Regulatory Commission. Quality assurance for radiological monitoring programs (normal operations) ; effluent streams and the environment. Rev. 1. Whashington ; D.C., 1979 (US Regulatory Guide 4.15).

FRANÇOIS H. et alii. Personnel dosimetry systems for external radiation exposures. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1970 (IAEA technical reports series, 109).

HIRAYAMA T. Interrelação entre grandezas utilizadas em radioproteção. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1982. (DERL.PD-009/82).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation protection of workers in the mining and milling of radioactive ores. Vienna, 1983. (IAEA safety series, 26).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation protection procedures. Viena, 1973 (IAEA safety series, 38).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Handbook on calibration of radiation protection monitoring instruments. Vienna, 1971. (IAEA Technical reports series 133).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Conceptual basis for the determination of dose equivalent. Washington, D.C., 1976 (ICRU report 35).



INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS.  
Average energy required to produce an ion pair. Washington,  
D.C., 1979 (ICRU report, 31).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS.  
Conceptual basis for the determination of dose equivalent.  
Washington. D.C., 1982.(ICRU report, 35)

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS.  
Dose equivalent. Washington, 1973. Supplement to ICRU  
report, 19.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. General  
principles of monitoring for radiation protection of  
workers. Oxford. Pergamon, 1982 (ICRP publication 35).

MAFRA NETO, FAUSTO. Dosimetria de radiação eletromagnética com  
o filme "Kodak Dental X-Rays" tipo periapical tamanho 2.  
Belo Horizonte, Universidade Católica de Minas Gerais, 1981.

MORGAN, K.Z. AND TURNER, J.E. Principles of radiation  
protection . Huntington, J. Wiley, 1973.

NUCLEBRÁS. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Di  
visão de Radioproteção. Descrição do sistema de dosimetria  
individual externa. Belo Horizonte, 1980.

NUCLEBRÁS. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Di  
visão de Radioproteção. Serviço de monitoração individual  
externa por filmes dosimétricos do CDTN/NUCLEBRÁS. 1. rev.  
Belo Horizonte, 1983. (DERL.PD.-022/83).

POLASTRO, C. LUIZ. Avaliação do serviço de monitoração indi-  
dual do CDTN. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1983,  
(DERL.PD.-003/83).

POLASTRO, B.S.L. VERA. Fundamentos e aplicação da dosimetria por termoluminescência. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1980.

POLASTRO, B.S.L. VERA. Manual de utilização do fluoreto de lítio para dosimetria de radiação X e  $\gamma$ . Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1983. (DERL.PD.-006/83).

POLASTRO, B.S.L. VERA. Sistema operacional de dosimetria individual externa. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1981, (DERL.PD.-013/81).

POLASTRO, B.S.L. VERA. Sistemática para execução de dosimetria individual externa por filmes dosimétricos. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1981. (DERL.PD.-014/81).

ROCHA, G.F. ANTONIO. Medicina Nuclear. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1976.

SANTOS, A.N. dos et alii. Curso de treinamento de operadores em reatores de pesquisa. 4 ed. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS/CDTN, 1980.

SCAFF, LUIZ ALBERTO MALAGUTI. Bases físicas da radiologia: diagnóstico e terapia. São Paulo, Sarvier, 1979.

STANDARD, methods for the examination of water and waste water. 15<sup>th</sup> ed. Washington, D.C., American Public Health Association, C. 1981.