

37.095881



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**GERAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA SIMULAÇÃO DE
DOSES EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO GAMA**

NELSON MINORU OMI

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientadora:
Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa

**São Paulo
2000**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**GERAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA SIMULAÇÃO DE DOSES
EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO GAMA**

NELSON MINORU OMI



**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Ciências na Área de Aplicações**

Orientadora:

Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa

SÃO PAULO

2000

*Dedico esse trabalho à minha
esposa, Vera, e a todos aqueles que,
me inspiraram a prosseguir em
direção à sua conclusão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa por sua orientação segura, além da compreensão e incentivo.

Ao amigo Paulo Roberto Rela, por seu incentivo e confiança, muitas vezes maior que a minha própria.

Pela paciência em conviver com o que posso definir como “presença ausente” durante os períodos críticos do desenvolvimento do Mestrado, agradeço à minha esposa, Vera Lúcia Martins de Mello Omi.

Pela possibilidade de chegar até aqui, sou grato aos meus pais, Katsumi Omi e Thereza Omi.

Agradeço também ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, pela oportunidade da realização desse Mestrado.

A todos os colegas do Departamento de Aplicações na Engenharia e Indústria, TE, por sua amizade e por todas as palavras e atitudes de incentivo oferecidos.

À Comissão de Pós Graduação do IPEN.

Ao Manuel Sanchez Gomes, Eliana Paula Pereira, Antonio Luiz Mendes e ao pessoal da Divisão Cobalto, da Johnson & Johnson Produtos Profissionais Ltda., pela visita concedida às suas instalações.

À Companhia Brasileira de Esterilização, pela concessão de visitas por oferecer a possibilidade de ensaiar as novas capacidades do aplicativo.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Características do controle de uma instalação de esterilização	3
1.3. Aplicativos existentes	5
1.4. Objetivo	6
2. RESUMO DA TEORIA E DESCRIÇÃO DO APLICATIVO	8
2.1. Método de cálculo	8
2.1.1. Cálculo de dose em um ponto	8
2.1.2. Cálculo do fator de multiplicação, ou fator de <i>buildup</i>	13
2.1.3. Simplificações consideradas no programa	14
2.2. Descrição do aplicativo	17
2.2.1. Dados gerais	17
2.2.2. Módulo de Entrada de Dados da Fonte, ou Módulo da Fonte	18

2.2.3. Módulo de Edição dos Dados da Geometria de Irradiação ou Módulo do Arranjo	21
2.2.4. Módulo de Descrição do Material Irradiado ou Módulo do Produto	23
2.2.5. Módulo do cálculo	27
3. PARTE EXPERIMENTAL	34
3.1. Ensaio realizados	34
3.2. Utilização de dosímetros PMMA	34
3.3. Comparação de resultados para doses no ar	37
3.4. Simulação de um processo de irradiação	39
3.5. Análise dos dados de um irradiador já instalado	43
3.6. Análise dos dados de um irradiador em fase de testes operacionais	47
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	56
5. CONCLUSÕES	62
6. ANEXOS	64
6.1. Anexo 1: Cálculo de π pelo método de Monte Carlo	64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

GERAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA SIMULAÇÃO DE DOSES EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO GAMA

Nelson Minoru Omi

RESUMO

Entre os processos adotados para a esterilização de vários tipos de produtos e alimentos, citam-se o uso de temperaturas elevadas, choques térmicos e agentes químicos. A radiação ionizante surgiu como mais uma opção, sendo utilizada para vários propósitos desde sua descoberta e foi viabilizada com o desenvolvimento tecnológico da segunda metade do século XX. Além da esterilização, várias utilidades para a radiação ionizante foram desenvolvidas, como é o caso de aplicações na área de saúde, tratamento e reciclagem de rejeitos industriais, conservação de alimentos, vulcanização, polimerização e indução de cor em gemas semipreciosas. Entre as fontes de radiação ionizante utilizados em larga escala, destaca-se o uso dos raios gama produzidos pelo ^{60}Co . A otimização desse processo tem sido realizada com muitos ensaios de mapeamento dosimétrico. O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um aplicativo capaz de atender à necessidade de simulação de doses em sistemas de irradiação que utilizam fontes de raios gama do ^{60}Co . Com sua utilização, um processo pode ser otimizado ainda na fase de projeto da instalação e também na fase de estudos de viabilidade de utilização de plantas de irradiação já instaladas para novas aplicações. A validação do aplicativo desenvolvido foi realizada com a simulação de um processo industrial já implantado e a sua flexibilidade foi verificada com a simulação de testes iniciais realizados em outra planta de esterilização.

DEVELOPMENT OF A DOSE SIMULATION SOFTWARE FOR GAMMA IRRADIATION SYSTEMS

Nelson Minoru Omi

ABSTRACT

The use of high temperature, thermal and chemical treatment are among the used sterilization process of food and many products. The ionizing radiation came as another option, it's being used for many purposes and it became available due to the technological development in the second half of the 20th century. Together with sterilization, many uses of the ionizing radiation were developed, such as applications on health, industrial products and waste recycling, food irradiation, vulcanizing, polymerization and gems color enhancing. The ⁶⁰Co gamma stands out among the used radiation sources on commercial facilities. It is used to optimize this process with many dose mapping tests. The objective of this work is to develop a software to simulate the doses in ⁶⁰Co gamma irradiation systems. It can be used to optimize, a process on the project stage of a facility and to make viability studies for new applications in installations already set up. The validation of this software was done comparing the simulation results with the dosimetry data of an operating irradiation plant. The flexibility of the software was verified with extra dosimetry tests performed in another sterilization facility.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Entre os processos adotados para a esterilização de vários tipos de produtos e alimentos, citam-se o uso de temperaturas elevadas, choques térmicos, luz ultravioleta e agentes químicos. Cada um desses processos tem eficácia em aplicações específicas, com restrições em materiais que sofrem danos na sua aplicação e até por deixarem resíduos indesejáveis, como é o caso de tratamentos químicos.

Com a descoberta da radiação ionizante, pesquisadores notaram que muitos organismos deixavam de se multiplicar e até pereciam diante da exposição à radiação. A utilização a radiação ionizante na preservação dos alimentos foi sugerida quase imediatamente após a descoberta da radioatividade por Henri Becquerel, em 1895. A sugestão da destruição de microorganismos em alimentos foi publicada em um jornal médico alemão no mesmo ano.

No início do século XX, foram requeridas patentes nos EUA e Inglaterra descrevendo o uso da radiação ionizante para destruir microorganismos nos alimentos. Porém, nessa época a única fonte de radiação ionizante era o isótopo de rádio, que era de difícil obtenção. Há registros de cientistas usando raios-X para matar insetos, ovos e larvas em folhas de tabaco, bem como eliminar parasitas de *Trichinose* em carne de porco. A viabilidade comercial desse processo esbarrou nos altos custos e nas dificuldades em se obter as fontes de radiação.

Após a segunda guerra mundial, com o surgimento dos reatores nucleares, surgiram fontes de radiação ionizante mais práticas. Com isso, a irradiação de alimentos se tornou um processo técnica e economicamente viável e a pesquisa deu ênfase à segurança e às novas aplicações da radiação ionizante.

A aplicação da radiação ionizante, com destaque para o uso de radiação gama de cobalto-60, é tecnologia consolidada na esterilização de diversos produtos por apresentar as seguintes vantagens:

- o processo é flexível, de elevada confiabilidade e fornece resultados repetitivos;
- não provoca resíduos por utilizar apenas a energia de radiação;
- provoca um aumento desprezível de temperatura durante o tratamento;
- permite que o produto seja esterilizado em sua embalagem final;
- tem custo competitivo em relação aos outros métodos.

Reconhecendo essas vantagens, a comunidade industrial e entidades que atuam nas áreas de saúde e de alimentação exercem fortes pressões para que sejam feitos, no País, desenvolvimentos das seguintes aplicações de processos de beneficiamento induzidos pela radiação:

- desinfestação e preservação de alimentos;
- esterilização de insumos e rejeitos hospitalares;
- esterilização de tecidos humanos para implantes cirúrgicos;
- indução de cor em gemas;
- desenvolvimento de novos materiais e produtos voltados para a facilidade do processo de esterilização via radiação.

Nesta direção, o IPEN está desenvolvendo o projeto de um irradiador utilizando fontes seladas de ^{60}Co com características de uma unidade multipropósito, ou seja, em condições de irradiar produtos em uma extensa faixa de doses, variando de 150Gy, para alguns produtos alimentícios, até 30kGy, para esterilização de produtos médicos e farmacêuticos.

Esta instalação permitirá à comunidade industrial, o acesso a novos métodos de desenvolvimento de produtos e incorporação de tecnologias modernas de produção em seus empreendimentos, contribuindo para o esforço de aumentar a qualidade e a competitividade dos produtos e serviços nacionais.

1.2. Características do controle de uma instalação de esterilização

Encontra-se com frequência na literatura a afirmação de que o único parâmetro a ser controlado nos processos de irradiação com ^{60}Co é o tempo de exposição dos produtos a serem tratados ^[1]. Esta afirmação é correta quando se mantém a mesma disposição dos produtos para um determinado arranjo de fontes radioativas. Entretanto, para estabelecer a disposição conveniente dos produtos e o tempo de irradiação, para cada tipo de produto, devem ser consideradas a sua densidade, a atividade, a geometria e a disposição das fontes radioativas utilizadas e as posições, relativas a essas fontes, que os produtos ocupam ao longo do período em que o material permanece dentro do irradiador. A definição desses parâmetros é fundamental na qualificação do processo de irradiação, ou seja, de obter e documentar evidências de que o processo permite beneficiar os produtos dentro de padrões aceitáveis de qualidade ^[2].

Como parte integrante da competitividade, a otimização do processo de irradiação é imperativa, sendo que a chave para a avaliação da produtividade de uma planta de irradiação é o custo por metro cúbico de produto irradiado e isso deve ser determinado na fase de planejamento do processo.

Na otimização do processo, o principal efeito a ser considerado é o da perda da intensidade de radiação ao atravessar o material e, portanto, a variação das doses ponto a ponto dentro do volume irradiado. A razão entre as doses máxima e mínima obtidas no produto, conhecida como fator de uniformidade de dose, é medida fundamental para determinar o excesso de dose obtido em relação à dose mínima especificada. Grandes excessos de doses (*overdoses*) devem ser evitados pois aumentam o custo em termos de perda de radiação ionizante e podem causar efeitos indesejáveis no material irradiado.

O sucesso para um projeto de baixa relação custo/benefício e de alta qualidade é assegurar as melhores condições de irradiação do produto. Isso significa um projeto visando o menor fator de uniformidade de dose, ou maior homogeneidade de dose e, ao mesmo tempo, a máxima eficiência de irradiação (razão entre a radiação absorvida pelo material e a emitida pela fonte).

Um bom fator de uniformidade pode ser atingido se a fonte tiver a dimensão maior que a do embalado do material, mas isso causaria perda de radiação ionizante, e, portanto, aumento no custo operacional. Já o uso de fontes de dimensões inferiores ao do embalado do material a ser beneficiado melhora o rendimento da irradiação mas pode piorar o fator de uniformidade de dose. O uso de geometrias adequadas, com múltiplas passagens ao longo da fonte e vários níveis verticais entre as passagens deve levar a uma boa razão de uniformidade de dose. Existem plantas de esterilização a ^{60}Co em operação que usam quatro passagens, duas de cada lado da fonte, em dois níveis verticais.

Para a especificação de uma instalação, com atividade total estabelecida para o conjunto de fontes radioativas, é usual fornecer a capacidade de produção, em metros cúbicos por unidade de tempo, tendo uma determinada dose em relação a uma densidade média, além do fator de uniformidade de dose. Como exemplo, um bom valor de otimização do processo de irradiação é o de tratamento de produtos médicos e farmacêuticos, com densidade média de $0,12 \text{ g/cm}^3$, que normalmente requerem uma dose de 25 kGy para a sua esterilização e a capacidade de processamento superior a $0,34 \text{ m}^3 / \text{h} / 100\text{kCi}$, tendo ainda o fator de uniformidade de dose menor que 1,3 [3].

A determinação dessas características tem sido feita empiricamente para cada tipo de material irradiado, com o uso de dosimetria em amostras irradiadas. Essa técnica passa a ser dispendiosa quando se deseja irradiar lotes de materiais diferentes pois, para cada tipo de material, um conjunto de amostras deve ser irradiado, de maneira a obter sua dosimetria completa e, se necessário, mais conjuntos de amostras devem ser submetidos à irradiação para que a viabilidade de se atingir os níveis de doses desejados, e o método para que isso aconteça, sejam definidos.

1.3. Aplicativos existentes

Em levantamento realizado nos últimos meses, observou-se o registro de um único programa específico para simulação de irradiadores comerciais, o DOSKMF2 que foi criado por A. Remmer ^[4]. Esse aplicativo foi desenvolvido para irradiadores de fontes circulares, para computadores de médio e grande porte e em linguagem PL/I, atualmente obsoletos. O desenvolvimento de aplicativos para cálculo de dose se voltou principalmente para problemas voltados a blindagem de reatores e para cálculo geral, como o Microshield ^[5], EGS4 ^[6] e MCNP ^[7].

Outro fato observado nesse levantamento é que a grande maioria dos aplicativos desenvolvidos para a área nuclear está baseada em linguagens e sistemas operacionais que estão entrando em desuso, como é o caso do Microshield, que utiliza o sistema operacional MSDOS, *Microsoft Disk Operating System*, e do EGS4 e MNCP, que se baseiam na linguagem FORTRAN, *Formula Translator*. Isso pode ser verificado nos bancos de aplicativos como o da NEA, *Nuclear Energy Agency*, na França, e os do CCS, *Center for Computational Sciences*, da ORNL, *Oak Ridge National Laboratory*, nos Estados Unidos da América.

A maior parte desses aplicativos não evita o problema com as datas posteriores a 31 de dezembro de 1999, conhecido como *Bug* do ano 2000. Para utilizar o Microshield, por exemplo, é necessário alterar a data no computador. Isso ocorre também para os aplicativos que utilizam a linguagem FORTRAN, em que o ano é indicado por 2 dígitos.

O aplicativo desenvolvido foi compilado na em linguagem C++, sendo compatível com os sistemas operacionais Windows95 e Windows98. A utilização da linguagem C++ facilita a sua adaptação para outros sistemas operacionais, pois essa linguagem possui versões para eles, como é o caso das versões de C++ para o LINUX e MacOS.

1.4. Objetivo

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um aplicativo para simulação de doses em sistemas de irradiação com o uso de fontes de raios gama do ^{60}Co , utilizando uma combinação de métodos de cálculo e tabelas existentes [8, 9 e 10] e que são de utilização normalmente complicada, se o cálculo for manual.

A utilização desse aplicativo pode minimizar a necessidade de ensaios para determinação da distribuição das doses e do fator de uniformidade, otimizando o sistema à partir de características do material a ser irradiado, obtidos em laboratório ou em cálculos básicos, e do arranjo montado para o processo. Assim o programa passa a ser essencial para o planejamento de um arranjo de irradiação, testando vários esquemas de modo a viabilizar e otimizar o processo, mantendo as doses dentro dos limites especificados para o material, com o menor desperdício de radiação ionizante e com o melhor fator de uniformidade de dose para diferentes densidades médias de produto.

As simulações e ensaios realizados em laboratório, com amostras em pequenas quantidades, são suficientes para determinar o arranjo que viabilize e otimize o processo de irradiação, dentro das condições de contorno da instalação. Com esse procedimento, podem ser minimizadas as perdas de tempo com os lotes de amostragem e a inutilização dos próprios lotes por terem recebido doses insuficientes ou excessivas nos ensaios.

O programa desenvolvido permite a visualização dessas simulações, através de um aplicativo de geração de gráficos, mostrando as curvas de isodose, e pode ser usado também no treinamento de operadores e para esclarecimentos do público, em geral.

Para atender a esses requisitos, o aplicativo desenvolvido possibilita:

- Oferecer diretrizes para a determinação dos pontos de dose máxima e dose mínima no produto beneficiado, com o uso dos dados referentes aos materiais envolvidos, à geometria e à dinâmica de irradiação;
- Determinar, considerando valores exatos de entrada de dados, os valores das doses com um erro máximo de 5%, e de 10% para o fator de uniformidade de doses;

- Admitir, para a obtenção dos resultados acima, dados comuns adotados para controle de um sistema de irradiação industrial;
- Realizar cálculos para sistemas com fontes dispostas em suportes planos;
- Computar configurações simétricas de irradiação, com número de posições, transversais, longitudinais e verticais, definidas pelo usuário, além de posições independentes;
- Permitir cálculo para configurações assimétricas;
- Computar a influência de volumes fixos entre a fonte e o material beneficiado, como chapas e perfis estruturais, podendo englobar também partes do sistema de transporte;
- Permitir o levantamento detalhado da distribuição de doses no produto;
- Ser rápido na obtenção de resultados mais simples, como é o caso do cálculo das doses nos pontos básicos para levantamento típico do fator de uniformidade de doses; e
- Ser compatível com o sistema operacional Windows95 e gerar relatórios que possam ser analisados por aplicativos comuns no mercado.

Esse programa vai ao encontro às necessidades de otimização de parâmetros a serem realizados na planta de irradiação multipropósito, com fonte de ^{60}Co , que será implantada no IPEN – Centro de Tecnologia das Radiações - CTR.

2. RESUMO DA TEORIA E DESCRIÇÃO DO APLICATIVO

2.1. Método de cálculo

2.1.1. Cálculos de doses em um ponto

Entre os métodos conhecidos para o cálculo de doses, dois se destacam por serem amplamente utilizados:

- Cálculo estatístico, com base no método de Monte Carlo^[6, 7 e 11], e
- Cálculo direto, com fonte e material irradiado considerados como pontos, mais conhecido como *Point Kernel*^[8 e 9].

O apêndice 1 mostra um exemplo simples de cálculo pelo método de Monte Carlo^[11], aplicado para a determinação do número pi (π). O cálculo utilizando o método de Monte Carlo se apoia na precisão e no detalhamento da interação da radiação com os materiais envolvidos e, por conseguinte, na identificação de cada elemento envolvido para fornecer respostas confiáveis. Embora sendo considerado padrão para determinação de doses em alguns casos, para que esse método forneça respostas com exatidão, são necessárias muitas simulações, o que aumenta o tempo de processamento. Para fontes de dimensões grandes e sistemas que envolvem vários materiais em volumes finitos, esse número de simulações aumenta em proporções geométricas.

Os materiais beneficiados em sistemas de irradiação multipropósito são muito variados e algumas de suas características não são levantadas detalhadamente, pois isso requer muito tempo e investimento, o que não é viável para uma aplicação comercial. Esse fato leva o cálculo de doses pelo método de Monte Carlo a fornecer resultados nem sempre confiáveis. O uso desse método só deve ser considerado padrão quando aplicado a

condições bem definidas, como é o caso de materiais homogêneos e de geometria bem definida, o que pode ser obtido em ensaios de laboratório.

A essência do método de *Point Kernel* é a integração das influências de fontes pontuais e isotrópicas que compõem uma fonte estendida, em um ponto, ou detector pontual, isotrópico.

A escolha do método de *Point Kernel* para o cálculo das doses foi efetuada pelo fato de oferecer respostas rápidas e com precisão relativamente boa em relação aos dados disponíveis de entrada. Assim, por exemplo, ao invés de detalhar o formato e a composição de cada elemento dentro de uma caixa, ao fornecer apenas a densidade média dessa caixa como dado, os cálculos oferecem resultados suficientemente próximos à realidade. Isso só não pode ser atingido para volumes onde haja variação notória na densidade interna, como caixas contendo grandes espaços ociosos.

A equação abaixo determina a fração da energia radioativa gerada em uma fonte puntiforme e isotrópica que passa por um determinado ponto no espaço, para fótons de uma dada energia^[9].

$$\Phi = B * \frac{A * \Gamma * E}{4 * \pi * d^2} * \exp\left(-\sum_i^n b_i * (\mu * \rho)_i\right) \quad (1)$$

onde:

Φ é o fluxo de energia no ponto estudado ($\text{MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$);

B é o fator de multiplicação, conhecido como fator de *buildup*, que corrige a taxa de exposição calculada para a influência da radiação secundária gerada no meio (adimensional);

A é a atividade da fonte (Bq);

E é a energia do fóton emitido (MeV);

Γ é a abundância gama dessa energia (número de fótons emitidos por decaimento) (adimensional);

d é a distância entre fonte e o ponto estudado (cm);

\exp é a função exponencial (e^x);

$\sum_1^n b_i * (\mu * \rho)_i$ é o número de caminhos livres médios, sendo n o número de blocos de material que estão entre a fonte e o ponto estudado, b_i o trecho da reta (cm) que atravessa o bloco i e $(\mu * \rho)_i$ é o coeficiente de absorção de massa ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) multiplicado pela densidade ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), resultando no coeficiente de atenuação linear (cm^{-1}), do material desse bloco, na energia do fóton. A exponencial dessa somatória indica a fração dos fótons emitidos na direção do ponto que não interage com o meio antes de atingir o ponto.

Com o fluxo, Φ , a fração dessa energia que efetivamente é absorvida no ponto é obtida aplicando o coeficiente de absorção de energia para o material. Com isso, obtém-se a taxa de energia absorvida por unidade de massa, ou seja, a dose.

Assim, a taxa de dose será dada pela equação:

$$\dot{D} = k * \Phi * \mu_{en} \quad (2)$$

onde:

\dot{D} é a taxa de dose (em $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$, ou $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);

Φ é o fluxo de energia passando pelo ponto ($\text{MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$); e

μ_{en} é o coeficiente de absorção de energia do material do ponto (em $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ou $[0,1] \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) e

k é o fator de correção $\frac{\text{MeV}}{\text{J}} * \frac{\text{kg}}{\text{g}} = \frac{1000 * \text{MeV}}{\text{J}} = 1,602 * 10^{-10}$

O ^{60}Co emite dois fótons por decaimento, com abundância maior que 99,9% sendo um deles de 1,173 MeV e outro de 1,332 MeV. Emite também outros dois fótons, de energias 0,347 MeV e 0,827 MeV, ambos com abundâncias menores que 0,01% e radiação beta com energia 1,48 MeV e 0,33 MeV, tendo, respectivamente, abundância 0,01% e 99,99% ^[9]. Em termos práticos, as emissões de raios gama de pequena abundância e a radiação beta podem ser consideradas como totalmente absorvidas pela própria fonte. Como a variação dos coeficientes de absorção e o fator de *buildup* variam pouco entre essas energias, é comum se fazer cálculos com o uso de coeficientes e fatores para a energia de 1,25 MeV. Para a execução do aplicativo, esses valores são extraídos das tabelas encontradas na publicação da *American Nuclear Society* ^[10].

O cálculo com esse método supõe que as dimensões da fonte sejam pequenas em relação às distâncias entre a fonte e os pontos estudados. Integrando a equação 1, obtém-se as equações para fontes bidimensionais, como fontes planas, lineares, e tridimensionais, com ou sem auto-absorção ^[9]. Essas equações são geradas para situações em que os materiais colocados entre a fonte e o ponto estudado têm pelo menos duas das dimensões muito maiores que as cotas envolvidas, de modo a serem consideradas infinitas. Como em uma instalação industrial a maior parte dos itens que ficam entre a fonte e o ponto irradiado possui dimensões que não atendem a esse quesito, as equações derivadas da equação 1 podem levar a erros inaceitáveis. A Figura 1 mostra um exemplo simples de como alguns materiais podem interferir no equacionamento.

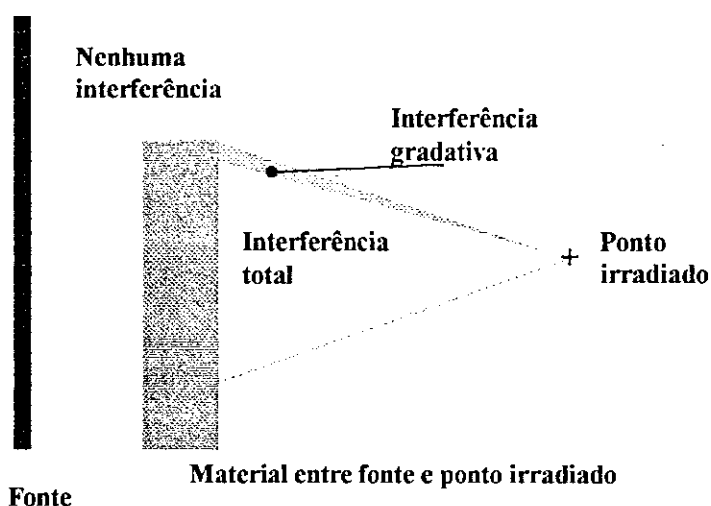


Figura 1: Interferência de um bloco de dimensões finitas na irradiação de um ponto.

Com a utilização de computadores, é possível calcular a dose em um ponto integrando numericamente as doses de pequenas partes da fonte, de modo a garantir que a condição de fonte pequena em relação à distância ao ponto irradiado seja satisfeita. Ao efetuar essa integração numérica, contorna-se também a dificuldade encontrada para equacionar a interferência parcial de um volume qualquer no fluxo de radiação vinda de uma fonte.

O aplicativo desenvolvido faz a soma dos cálculos para cada unidade de fonte selada industrial, que também é conhecida como lápis por possuir formato similar, tomando-o como sendo linhas de elementos ativos. Uma vez que a distribuição das atividades do ^{60}Co em um lápis normalmente não é levantada com detalhes, considera-se que essa distribuição é homogênea ao longo do seu comprimento ativo, considerado comprimento útil. O aplicativo divide o lápis em partes iguais cujo comprimento equivale a no máximo $1/13$ da distância mínima entre o ponto e a parte útil do lápis, para manter o desvio resultante abaixo de 1% sem aumentar em demasia o número de cálculos intermediários. Assim, quanto mais próximo o ponto, maior será o fracionamento da fonte. Esse fracionamento é realizado em no mínimo cinco partes para levar em conta a possível interferência parcial de alguns blocos entre o lápis e o ponto estudado.

Essa interferência, é calculada como atenuação da radiação no material à partir do trecho da reta, que passa pelo centro da fração do lápis e pelo ponto estudado, onde exista a interferência de algum material da estrutura ou do próprio produto. A Figura 2 mostra, esquematicamente, a maneira como o aplicativo divide o lápis antes de realizar a integração. A equação 1 é aplicada para cada fração de fonte entre as raias mostradas na figura e seus resultados são integrados para obter o fluxo no ponto irradiado.

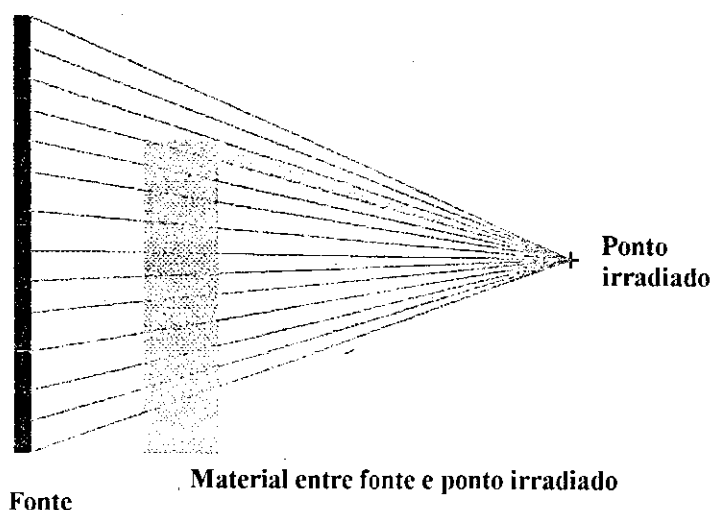


Figura 2: Divisão da fonte para integração. O cálculo é efetuado considerando o material que está em cada setor para o qual ele é efetuado.

Também é nesse trecho de reta que, para todas as interferências que possam existir, é calculado o fator de *buildup* entre essa fração da fonte e o ponto estudado.

Para se ter uma idéia do número de cálculos realizados na simulação das doses em um irradiador comercial, com 25 posições estáticas de irradiação em frente à fonte, com um ponto e um lápis, os cálculos acima descritos são realizados, em média, 250 vezes antes da integração. Para cada centena de lápis e tendo 27 pontos estudados no material, pode-se chegar a mais de 675.000 cálculos básicos antes da integração dos valores.

2.1.2. Cálculo do fator de multiplicação ou fator de *buildup*

O fator de multiplicação, mais conhecido como fator de *buildup*, é um parâmetro que sintetiza o efeito de radiações secundárias, no fluxo ou na energia absorvida, em um ponto irradiado. Pode-se definir fator de *buildup* como sendo a razão entre o efeito total da radiação e o efeito provocado apenas pela parte dessa radiação que não interagiu com o material antes de atingir o ponto estudado. Esse fator é utilizado para corrigir os valores da exposição e da energia absorvida calculados pelo método de *Point Kernel*.

Por causa da grande quantidade de parâmetros que podem influenciar a determinação desse fator, o levantamento do *buildup* restringe-se a materiais homogêneos

e infinitos, tendo como variáveis a radiação monoenergética, tipo e quantidade de material, representada pelo número de caminhos livres médios, ou *mean free path* (mfp), entre a fonte e o ponto estudado. As tabelas de fatores de *buildup*, com dados levantados empiricamente e com simulações numéricas utilizando o método de Monte Carlo, são encontradas na literatura^[9 e 10].

Além das tabelas acima mencionadas, vários cientistas, como Berger, Taylor, Michieli^[12] e outros, propuseram equações que fornecem o valor aproximado do *buildup* em relação à energia do fóton e à quantidade de mfp entre a fonte e o ponto estudado, com coeficientes tabelados por energia e material. Essas equações são de grande valia na obtenção de fatores de *buildup* para energias diversas da radiação gama.

O aplicativo desenvolvido adota o uso direto das tabelas de *buildup*^[10] para a energia média dos dois raios gama emitidos. O comportamento desse fator, para essas energias, nos tipos de materiais utilizados nas instalações e nos materiais beneficiados, favorece a adoção de valores médios entre os elementos mais comuns sem grandes perdas na precisão dos resultados. Assim a curva do fator de *buildup* acaba sendo resumida a um polinômio, tendo como variável o número de caminhos livres médios percorridos no material absorvedor.

2.1.3. Simplificações consideradas no programa

Ao serem considerados os propósitos do aplicativo, foi necessário considerar uma série de simplificações no comportamento dos materiais e nos cálculos, sendo que muitas são consideradas normais e utilizadas nos cálculos cotidianos. Entre elas, citam-se:

- As fontes são homogêneas e isotrópicas, e possuem diâmetro desprezível;
- Os meios por onde a radiação passa são homogêneos, consistindo de blocos paralelepípedos definidos;

- A taxa de dose em todos os pontos é suficientemente pequena para que as propriedades de interação dos materiais com a radiação ionizante não sejam alteradas, garantindo assim o efeito linear na soma das doses originadas por frações da fonte;
- Os coeficientes de interação dos materiais normalmente irradiados variam pouco entre si em relação à radiação gama do ^{60}Co , com exceção dos compostos com alto teor de hidrogênio, cujo comportamento foi considerado à parte no programa;
- Consideram-se as emissões gama de 1,173 MeV e 1,338 MeV, de abundância praticamente unitária, como sendo duas emissões gama de 1,2525 MeV de abundância unitária (ou 100%), desprezando-se as outras emissões;
- A utilização de valores de *buildup* para meios infinitos em volumes finitos, presentes nas tabelas da *American Nuclear Society*^[10];
- Os fluxos e doses as calculadas se devem apenas à fonte de ^{60}Co e os componentes entre a fonte e o material beneficiado, desprezando-se os efeitos da radiação refletida nas paredes, teto, piso, estruturas de sustentação e de transporte, salvo se estes estiverem entre os pontos estudados e a fonte.

As fontes normalmente são compostas de barras de ^{60}Co com diâmetro pequeno, geralmente em torno de 7 mm, montadas de forma a atingirem o comprimento útil desejado e encapsuladas em tubos de aço inoxidável. Os processos de fabricação da fonte minimizam mas não eliminam a variação na atividade dessa fonte ao longo do comprimento, sendo que alguns modelos de lápis também possuem espaçadores de aço inoxidável entre segmentos de cobalto. O efeito dessas variações é evidenciado nas proximidades da fonte^[13]. Em uma planta comercial de esterilização por radiação ionizante, as flutuações geradas por essa variação são minimizadas no processo como um todo.

Ao considerar blocos homogêneos, simplifica-se a descrição da maior parte dos materiais normalmente irradiados, como é o caso de materiais médico-hospitalares e alimentos. Isso significa que o programa não deve fornecer uma análise localizada de alta precisão, como, por exemplo, a diferença de doses entre o caroço e a casca de uma manga,

mas fornece a dose média de uma região, como se o material fosse homogêneo, e esses desvios são perfeitamente aceitáveis para uma instalação comercial. Para o caso de variação muito grande da densidade no produto, os desvios podem ser minimizados dividindo-se esse produto em vários blocos onde essa densidade possa ser considerada aproximadamente homogênea, aumentando-se assim a precisão dos resultados. Como limite, imposto pelo programa, o produto irradiado pode ser descrito por no máximo 50 blocos distintos.

Em instalações de irradiação, as taxas de dose envolvidas e as energias da radiação gama emitida não comprometem a linearidade na soma das doses emitidas pelas frações de cada lápis montado na fonte. Esse fato torna possível a integração linear das doses.

Embora uma instalação de esterilização por radiação ionizante possa irradiar qualquer material, os elementos usualmente encontrados em percentuais significativos de massa nos produtos tratados são, além do hidrogênio, o carbono, o nitrogênio, o oxigênio, o cálcio, o silício, o ferro, o alumínio, o cobre e o magnésio. Elementos com alto número atômico, como chumbo, urânio, ouro e mercúrio podem estar presentes na composição, mas em frações desprezíveis de massa. Com isso, o uso de coeficientes de interação da radiação com água e da média desses coeficientes para os elementos comuns é suficiente para manter dentro de 2% o erro derivado dessa simplificação.

Os valores encontrados nas tabelas de *buildup* da *American Nuclear Society*^[13] foram levantados para meios considerados infinitos. O fato de a maioria dos volumes envolvidos não corresponderem a esse requisito implica na aceitação de um pequeno desvio no resultado final. Para as substâncias presentes em um irradiador e os materiais normalmente irradiados, esse erro pode ser considerado como desprezível. A adoção da média dos fatores de *buildup* para os elementos citados também implica na tolerância de um desvio máximo de 1% no resultado final.

A geometria de irradiação numa instalação, com paredes de concreto suficientemente distantes do material irradiado e estrutura projetada para minimizar sua interferência no processo, faz com que as doses da reflexão da radiação nesses pontos sejam pequenas o suficiente para que se possa desprezá-las. O desvio estimado para os pontos mais próximos a essas estruturas é de menos de 1%.

Com essas fontes de erro estima-se um desvio máximo total de 5% para os cálculos, supondo que os dados utilizados sejam exatos.

2.2. Descrição do aplicativo

2.2.1. Dados gerais

O aplicativo desenvolvido, doravante chamado de Cadgamma, foi desenvolvido em C++ para uso no ambiente MSWindows95, sendo compatível também com o MSWindows98 e MSWindows2000. O nome escolhido deriva das palavras *Computer Aided Design* e da palavra *gamma*, em inglês.

Considera-se que o aplicativo está em sua versão primária, pois, como todos os aplicativos desenvolvidos, as necessidades dos usuários e as novas capacidades a serem incluídas no futuro, vindas de opiniões dos que o utilizarem, provavelmente implicarão no lançamento de versões posteriores.

O Cadgamma possui quatro módulos básicos, a saber:

- Módulo da fonte, que manipula os dados da fonte de cobalto e os organiza para o cálculo das posições e da atividade de cada elemento dessa fonte;
- Módulo do arranjo, que manipula os dados do arranjo físico das caixas, organizando-os para o cálculo das posições ocupadas no irradiador durante o processo;
- Módulo do produto, que manipula os dados do produto a ser irradiado; e
- Módulo de cálculo, que fornece meios de determinar pontos de referência para o cálculo das doses e emite relatórios da distribuição de doses para análise.

Os próximos itens desse capítulo são dedicados à descrição dos dados utilizados pelo Cadgamma, bem como suas capacidades e limitações.

2.2.2. Módulo de Entrada de Dados da Fonte, ou Módulo da Fonte

A fonte de um irradiador industrial constitui-se de cápsulas seladas de material radioativo que, pelo seu formato longo e cilíndrico, são conhecidas como lápis.

Esses lápis têm o material radioativo em cerca de 80% do seu comprimento, com duplo encapsulamento em tubos de aço inoxidável, sendo que as extremidades são projetadas para fornecer um encaixe seguro nos magazines e assegurar uma pequena folga entre lápis adjacentes, na região onde o material radioativo está alojado.

Os lápis normalmente têm segmentos cilíndricos e de pequeno diâmetro de ^{60}Co , produto da ativação do ^{59}Co por meio de fluxo de nêutrons em reatores nucleares. Embora caindo em desuso, o ^{137}Cs também tem sido utilizado como fonte de raios gama. O fato de o ^{137}Cs emitir radiação gama de energia menor que o ^{60}Co , além da dificuldade de obtenção e manipulação do isótopo, concorre para o fim do uso desse elemento como fonte para instalações industriais. Incluindo o duplo encapsulamento, o diâmetro da parte ativa do lápis é, geralmente, menor que 10 mm, e o seu comprimento é da ordem de algumas centenas de mm.

Os magazines têm a função de formar subconjuntos de lápis, facilitando a montagem e manutenção do suporte, conhecido como *rack* de fontes. Sendo estruturas mais simples que os *racks* e por possuírem uma fração de seu peso e de sua atividade total, possibilitam operações mais seguras de colocação e troca dos lápis. Esse fracionamento aumenta também a segurança do ponto de vista de proteção radiológica. Em aplicações industriais, as posições não ocupadas por lápis de ^{60}Co são preenchidas por lápis fantasia, ou sem o isótopo radioativo.

O posicionamento dos lápis, normalmente fornecidos com quantidades variadas de ^{60}Co , deve ser feito de acordo com a sua atividade, de modo que o conjunto formado com os outros magazines ofereça a melhor distribuição de doses no produto beneficiado. O Cadgamma calcula as doses levando em consideração a posição e atividade de cada lápis, de forma a poder otimizar a instalação simulando o posicionamento dos lápis de ^{60}Co que estejam disponíveis para montagem.

O módulo de entrada de dados da fonte, ou módulo da fonte, organiza os dados de posição dos magazines e dados dos lápis nela montados, utilizando-se para isso de janelas específicas para cada operação.

A Figura 3 mostra a janela principal desse módulo, com dados de um *rack* projetado para trabalhar com até 4 magazines, tendo 3 posições ocupadas e uma vazia.

Identificação dos Magazines da Fonte			
Posição:	h=-250.0; v= 715.0	- NORDION_JC_2	atividade 3.87PBq (104.71kCi)
Posição:	h=-250.0; v= 1240.0	- vaga	
Posição:	h= 250.0; v= 715.0	- NORDION_JC_4	atividade 3.87PBq (104.67kCi)
Posição:	h= 250.0; v= 1240.0	- NORDION_JC_1	atividade 3.87PBq (104.55kCi)

Atividade Total: 11.61PBq (313.92kCi) Data de referencia: 01/04/1999

Retirar o Magazine Editar o Suporte Salvar Coao Fechar

Figura 3: Exemplo de janela de edição dos dados da fonte, exibindo dados de 3 magazines instalados em uma fonte com 4 posições de montagem.

Na lista, que ocupa a área superior da janela, são mostradas linhas contendo as cotas das posições disponíveis para montagem desses magazines. Nas posições ocupadas, o aplicativo exibe a identificação e a atividade total dos lápis nele montados em PBq (10^{15} Bq) e kCi ($3,7 \times 10^{13}$ Bq). O usuário pode alterar o *rack* como um todo ou um dos magazines, retirando, trocando ou inserindo um novo em posições vagas.

O aplicativo permite ainda a alteração da data de referência para as atividades mostradas. Os cálculos do decaimento podem ser realizados para qualquer data entre 01/01/1945 e 31/12/2100, pois, antes de 1945, o ^{60}Co era raro e estima-se que programas mais sofisticados possam surgir no próximo século. A presença do “*Bug do milênio*”, que se resume na interpretação das datas do início do século XXI como sendo do início do

século XX em alguns computadores, foi evitada com o uso de rotina interna de cálculo de diferença de dias entre duas datas.

A Figura 4 mostra o esquema de colocação dos lápis em um magazine e o esquema de montagem dos magazines no suporte ou *rack*.

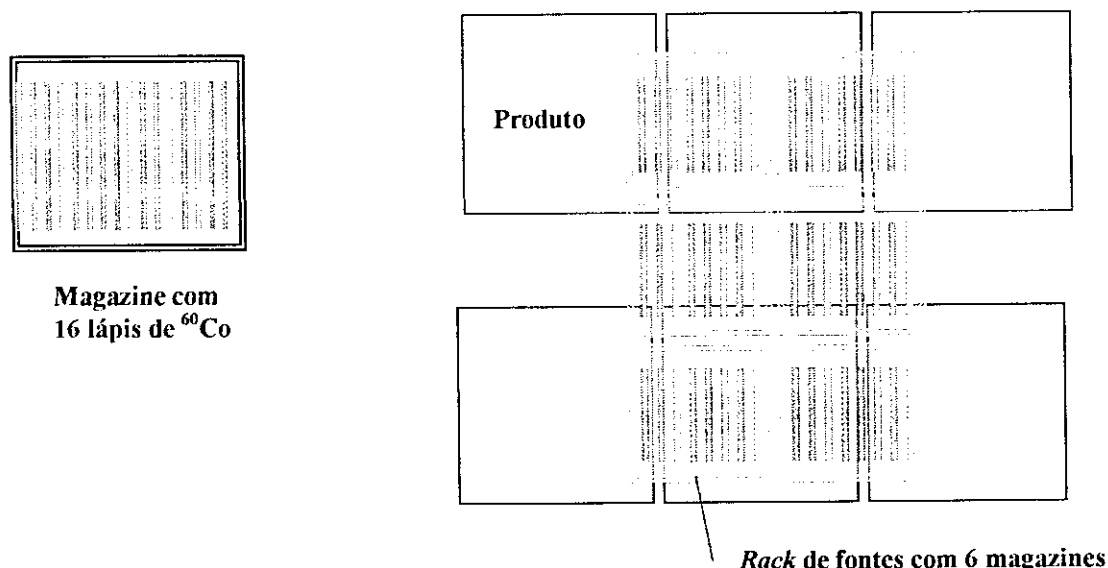


Figura 4: Esquema de um magazine com 16 lápis de atividades diferentes, à esquerda, e de um *rack* de fontes com 6 magazines.

O posicionamento e a descrição dos lápis nos magazines são feitos individualmente, permitindo ao aplicativo identificar a sua posição no *rack*, e sua atividade na data de calibração para realizar o cálculo da influência desses lápis nos pontos irradiados. Porém, o magazine é considerado como um bloco único no aplicativo e, ao mudá-lo de posição, todos os seus lápis o acompanham mantendo sua posição relativa. Isso simula a operação de montagem e desmontagem do *rack*.

Uma vez definidos e aceitos os dados representados nesse módulo, o usuário tem a liberdade de selecionar o arquivo, incluindo seu diretório, onde eles serão registrados. O módulo de cálculo fará uso desse arquivo, bem como os gerados nos módulos de arranjo e de produto.

2.2.3. Módulo de Edição dos Dados da Geometria de Irradiação ou Módulo do Arranjo

A irradiação do material em uma instalação a ^{60}Co é realizada, sempre que possível, na embalagem final do produto. Para possibilitar a irradiação de grandes quantidades de material, é comum o acondicionamento desse material em caixas ou pacotes grandes. Essas caixas são, então, montadas em um sistema de transporte que as mantém paradas em posições determinadas e sequenciais ao redor da fonte durante o processo de irradiação. O tempo de parada é igual para todas as posições e, normalmente, é várias vezes maior que o tempo de trânsito entre elas. A maior parte dos irradiadores possui um arranjo de posições tal que pode ser descrito como uma malha com nós equidistantes em cada uma das direções. Esse tipo de arranjo pode ser considerado como de posições parametrizadas. Algumas posições fora dessa malha, como as de entrada no irradiador, podem expor o produto a doses não desprezíveis, e essas posições são consideradas como independentes.

Também existem irradiadores que, por várias razões, não possuem posições parametrizáveis. Busca-se, no projeto dos irradiadores, o posicionamento simétrico de todas as posições de irradiação, motivo pelo qual a malha de posições parametrizadas e algumas posições independentes estão presentes na maior parte dos processos conforme a Figura 5.

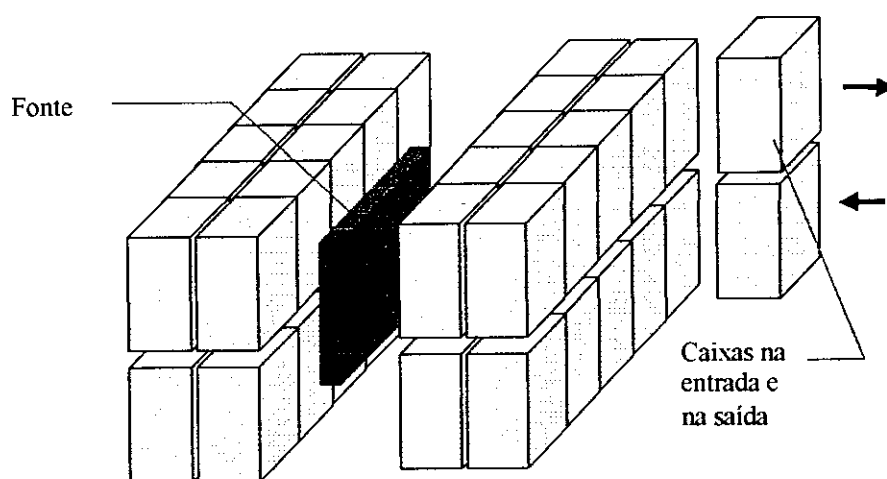


Figura 5: Esquema de distribuição das caixas em uma instalação hipotética, com 2 caixas em posição de espera (entrada e saída).

Em todos os irradiadores existem estruturas que se interpõem entre a fonte e as caixas de transporte. Embora sendo projetadas para minimizar a sua influência no processo, não é possível eliminá-las. Entre elas, podemos citar as estruturas de proteção da fonte e estruturas de sustentação de caixas, como bandejas ou esteiras, em sistemas com passagem em alguns níveis verticais. O aplicativo trata esses itens como partes do arranjo.

A janela do arranjo, conforme Figura 6, mostra os dados que identificam as posições que as caixas irão ocupar, durante um período determinado, no irradiador e as partes fixas do sistema que interferem no processo.

Arquivo | Ed | Ajuda | Arranjos | Ficticio1.com

Parâmetros de posicionamento :

Número de Passos Longitudinais:

Tamanho do passo (em mm):

Número de Passos Laterais:

Tamanho do passo lateral (em mm):

Número de passos verticais:

Tamanho do passo vertical (em mm):

Cota Transversal Mínima do Produto:

Cota longitudinal da posição 1:

Posições independentes:

Cotas em mm	
1 -	(910.0,700.0, 0.0)
2 -	(910.0,100.0,700.0)

Barreiras fixas (simétricas)

Dados (como blocos)		
Item	Descrição	Densidade
1 -	Chapa_verti -	7.80000kg/l
2 -	Chapa_Horiz -	7.80000kg/l
3 -	U1_sup -	7.80000kg/l
4 -	U1_inf -	7.80000kg/l
5 -	U1_abainf -	7.80000kg/l
6 -	U1_abasup -	7.80000kg/l
7 -	U1_topo -	7.80000kg/l
8 -	U2_sup -	7.80000kg/l
9 -	U2_inf -	7.80000kg/l
10 -	U2_abainf -	7.80000kg/l
11 -	U2_abasup -	7.80000kg/l
12 -	U2_topo -	7.80000kg/l
13 -	U3_sup -	7.80000kg/l
14 -	U3_inf -	7.80000kg/l
15 -	U3_abainf -	7.80000kg/l
16 -	U3_abasup -	7.80000kg/l
17 -	U3_topo -	7.80000kg/l

Passagem:

Simétrica (2 lados da fonte)

Semi-espelhada

Figura 6: Janela do arranjo, mostrando dados fictícios de uma instalação com uma malha com 40 posições parametrizáveis e 2 posições independentes, além de 32 blocos para definição da parte da estrutura que interfere no processo.

Essa janela é dividida em 3 partes básicas, ou seja:

- Conjunto de dados para a geração das posições parametrizadas;
- Lista de dados de posições independentes; e
- Lista de dados estruturais, fixos na sala do irradiador e que interferem diretamente na irradiação do material a ser beneficiado.

O título dessa janela mostra o nome completo do arquivo de arranjo, incluindo o diretório, com o qual a rotina está trabalhando.

O usuário pode alterar os valores diretamente nas janelas de edição. Esses valores têm sua validade verificada pelo programa no ato de aceitação. O usuário pode optar, ainda, pelo cálculo de um sistema em que a passagem é feita simetricamente pela frente e por trás da fonte e ainda se o cálculo levará em conta a passagem semi-espelhada, ou seja, terá inversão das posições entre metades do produto, levando em conta uma divisão transversal na caixa de transporte.

Dois campos de opção condicional, abaixo e à esquerda da janela, fornecem a possibilidade da escolha.

Assim como no módulo anterior, o módulo do arranjo permite ao usuário registrar os dados desse módulo em arquivo de sua escolha.

2.2.4. Módulo de Descrição do Material Irradiado ou Módulo do Produto

Nas instalações industriais de irradiação a ^{60}Co englobadas pelo escopo do aplicativo, o produto normalmente é transportado em volumes independentes que ocupam as posições de irradiação ordenadamente. Esses volumes contêm, além do material que deve ser beneficiado, ou produto, o aparato de sustentação deste, como caixas de transporte e estrados. Para simplificar, tudo o que é agregado ao produto é tratado como parte da caixa de transporte, pois a posição desses materiais é fixa em relação ao material a ser irradiado. Alguns exemplos são mostrados na Figura 7.

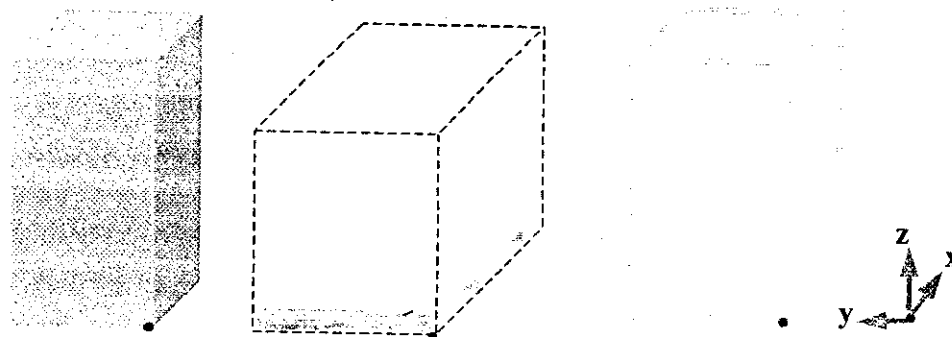


Figura 7: Caixas de transporte. Da esquerda para a direita, caixa de papelão, estrado com produto empilhado e caixa de chapas de alumínio.

Nessa Figura, para o estrado, as dimensões da caixa de transporte são mostradas pela linha tracejada. Nela, os pontos vermelhos indicam a referência utilizada para o posicionamento da caixa de transporte no irradiador, sendo também a origem da referência do posicionamento dos blocos que descrevem essa caixa. A Figura 7 mostra os eixos cartesianos para a fonte montada à direita das caixas. Nela, os eixos x , y e z são identificados para o posicionamento longitudinal, transversal e vertical, relativos à caixa de transporte.

O aplicativo pode tratar essas caixas de transporte como um todo ou como um conjunto de blocos com material de propriedades homogêneas. Assim, possibilita o cálculo da influência das partes que possuem densidades muito diferentes, como caixas e estrados, além de permitir o estudo em produtos com volumes de características distintas em uma mesma caixa de transporte, conforme mostra a Figura 8.

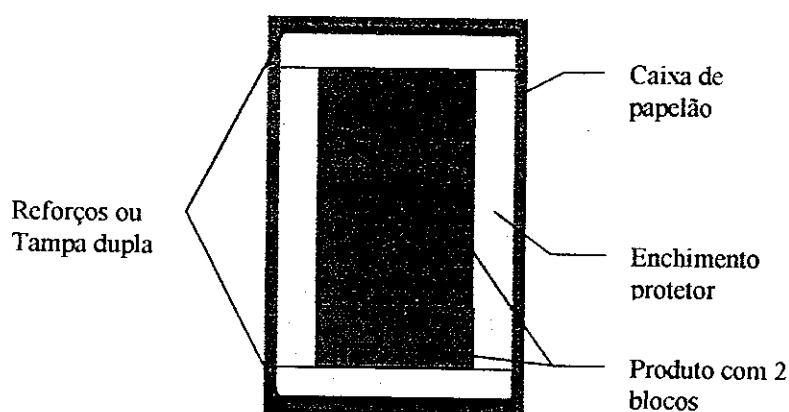


Figura 8: Esquema de uma caixa contendo o produto em sua embalagem final, em corte.

Essa configuração é ilustrativa, e mostra o corte da caixa de transporte que, além da caixa de papelão com espessura constante, as tampas reforçadas superior e inferior e 6

blocos de material de baixa densidade para proteção, tem os dois blocos de produto com densidades diferentes. Embora esse tipo de configuração deva ser evitado de modo a aproveitar melhor a fonte de ^{60}Co , podem haver casos onde a irradiação na embalagem final seja técnica e economicamente aconselhável.

Com esse recurso, o aplicativo pode simular também a distribuição de caixas de materiais com densidades diferentes dentro da caixa de transporte, de modo a minimizar o fator de uniformidade de doses. Por exemplo, poder-se-ia misturar caixas de temperos ou chás, compactados e à granel, com caixas contendo saquinhos desses produtos, dentro de uma caixa de transporte de modo que as doses fossem quase homogêneas. Outro exemplo seria o cálculo de doses para caixas de tamanho padrão com produto a ser beneficiado que não pode preencher totalmente o seu volume. Essas caixas poderiam ser completadas com algum material leve para possibilitar o empilhamento seguro.

Os espaços vazios são tratados pelo Cadgamma como contendo ar seco nas condições normais de temperatura e pressão.

A janela principal de edição de dados do produto tem duas áreas distintas, sendo uma para definição da caixa que contém o produto, ou indicação de que ela não é utilizada, e a outra para inserção dos blocos homogêneos da caixa de transporte.

Na área de definição da caixa de contenção, situada à esquerda da janela, o usuário edita as dimensões da caixa de transporte e, para os sistemas que usam caixas de contenção com essas dimensões, a espessura, a densidade das paredes das caixas e indica se o material da caixa tem baixo teor de hidrogênio. Nessa área, uma caixa de texto não editável mostra a quantidade de blocos usada para definir a caixa de transporte, além da caixa de contenção.

A Figura 9 apresenta a janela de edição do produto, com dados de um produto acondicionado em uma caixa de papelão tendo 3,2 mm de espessura e tampas duplas. Essa duplicidade é destacada com a presença dos blocos das tampas superior e inferior.

Arquivo: C:\Cadgamma\Produtos\Estudo3a.pro

Dados da caixa de transporte:

Largura (mm): 500.00

Altura (mm): 550.00

Profundidade (mm): 300.00

Caixa fechada

Baixo teor de Hidrogênio

Espessura (mm): 3.20

Densidade (kg/l): 0.197

Dados de 3 blocos

Item	Tipo	Densidade
1 -	Teste-M	0.10400kg/l
2 -	Tampa_inferior	0.19710kg/l
3 -	Tampa_superior	0.19710kg/l

Inserir Retirar

Aceitar Ler Arquivo Cancelar

Figura 9: Janela de edição do produto, com os dados de uma caixa contendo 3 blocos de produto.

A caixa de contenção pode ser fechada ou aberta, isto é, com ou sem a tampa superior, além de ter teor baixo ou alto de hidrogênio. Isso é determinado por meio do uso dos campos de seleção condicional para caixa fechada e baixo teor de hidrogênio. Com esses dados, o programa gera, respectivamente, 6 ou 5 blocos com as dimensões das paredes da caixa de transporte. A inexistência dessa caixa pode ser indicada ao anular a sua espessura. As dimensões da caixa de transporte são imprescindíveis para o programa, e nenhuma delas pode ser nula. À direita da janela, situa-se a lista contendo dados resumidos dos blocos que compõem a caixa de transporte.

Apoiado na rapidez de resposta do aplicativo, o usuário pode detalhar o produto em um primeiro cálculo e verificar se a influência de cada detalhe justifica a sua descrição separadamente. Muitas vezes, o uso de um único bloco englobando todo o conjunto irradiado é suficiente para que se obtenha resultados satisfatórios.

2.2.5. Módulo do cálculo

O módulo do cálculo é acessado da janela principal do Cadgamma, por meio da opção de cálculo na barra de ferramentas. Os dados da fonte, do arranjo e do produto são lidos de arquivos intermediários e são inicialmente armazenados para servirem de base para os cálculos das taxas de dose no processo de irradiação. O módulo lê também um arquivo contendo registros sobre a última configuração utilizada nos cálculos.

O usuário pode escolher o nome e localização dos arquivos de registro dos resultados do processo de cálculo, o grau de detalhamento desses resultados, o método de distribuição dos pontos para os quais a dose será calculada e a unidade da taxa de dose. Pode ainda definir a data de referência para a qual as doses devam ser calculadas ou optar pela obtenção dos resultados normalizados para uma fonte com 37 PBq, ou 1000 kCi, e pelo encerramento do programa ao término do processamento.

O cálculo pode ser feito para pontos distribuídos em uma malha de pontos equidistantes limitados por um bloco. Para essa opção, o aplicativo divide o bloco em planos, incluindo as suas faces, e determina esses pontos nas suas interseções. Essa malha de pontos pode ser tridimensional ou plana. A Figura 10 mostra o modo como o aplicativo determina essas divisões.

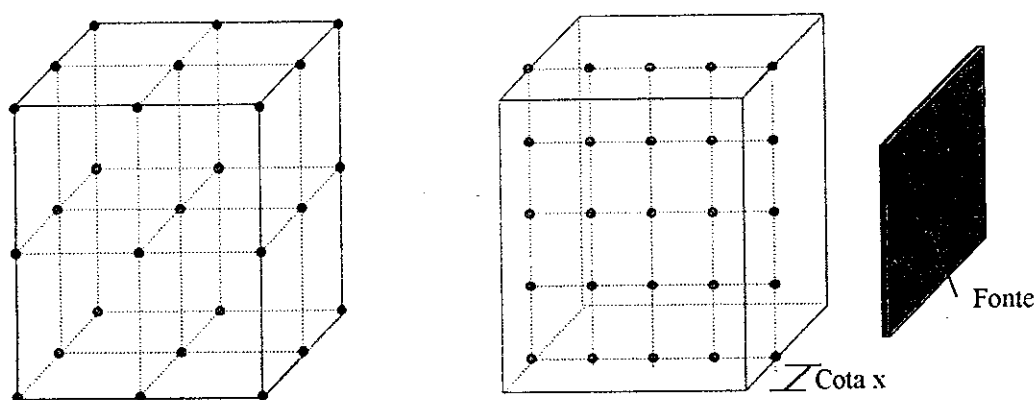


Figura 10: Malhas de pontos equidistantes em um bloco, com 3 x 3 x 3 pontos, e em um plano vertical perpendicular à fonte, com 5 x 5 pontos na cota longitudinal x.

Esses pontos são determinados para o bloco de referência selecionado e transferidos para o sistema cartesiano da caixa de transporte, descrito na seção do módulo do produto.

O cálculo pode ser realizado também para pontos definidos pelo usuário, também baseados no bloco de referência.

Para controlar os parâmetros de cálculo, e de fornecimento de resultados, foi projetada a janela do módulo de cálculo, apresentada na Figura 11.

The screenshot shows a software window titled 'Arquivos e exemplos - Exemplo 11.2 e 11.3'. It is divided into several sections:

- Opções de cálculo:** Includes a date field 'Usar atividades do dia: 01/04/2000'. Under 'Geração de pontos equidistantes', 'Gerar pontos em um plano paralelo' is selected. A button 'Gerar 9 x 9 pontos no plano paralelo, na profundidade y= 195,0mm' is visible. Below, 'Bloco de referência e suas dimensões (em mm)' shows 'Caixa de transporte: (500,0 x 400,0 x 600,0)', 'Material teste: (200,0 - 300,0 - 380,0)', and 'Reforço superior: (490,0 x 390,0 x 5,0)'. There is also an option 'Estudar pontos independentes' with an 'Editá-los' button.
- Opções de Gravação:** Includes checkboxes for 'Detalhar as posições de irradiação e as interferências fixas', 'Detalhar atividades dos lápis', and 'Gravar as taxas de dose de todas as posições no irradiador' (checked). An 'Arquivo:' field contains 'C:\Cadgamma\Resultados\Dissertação_53'.
- Opções de finalização:** Includes 'Fornecer taxas médias de dose em' with 'kGy/Hora' checked and 'kGy/Minuto' unselected. A 'time setting' field is set to '10.00.0' minutos. Other options include 'Normalizar resultados para a fonte com 37PBq (1000kCi)', 'Fechar o aplicativo ao final do processo de cálculo', and 'Minimizar a janela durante o processo de cálculo'. Buttons for 'Iniciar os cálculos' and 'Voltar' are at the bottom.
- Resultados de cálculo para a atividade de 1028Pbq (293,99kCi):** A table with columns 'Ponto', 'Cotas x, y e z (em mm)', 'Taxa média', and 'Dose total'. It lists 10 points with their coordinates and corresponding dose rates and total doses.
- Dose Máxima:** A summary box for point 49: '(306,2, 195,0, 217,5); 2,99kGy/hora, 20,90kGy'.
- Dose Mínima:** A summary box for point 9: '(0,0, 195,0, 580,0); 2,66kGy/hora, 18,60kGy'.
- Relação entre a dose máxima e a dose mínima:** 1,123.
- Obs.:** Dose total para 7,00 horas de irradiação.

Figura 11: Janela de cálculo, com os resultados para um irradiador fictício, calculados para uma malha de 9 x 9 pontos em um plano paralelo à fonte.

Essa janela possui 4 seções, a saber:

- **Opções de Cálculo** – com 3 subdivisões, onde o usuário determina a data para a qual os resultados serão calculados e indica a maneira como são determinados os pontos para os quais serão realizados os cálculos de dose.
- **Opções de Gravação** – onde o usuário determina o nome dos arquivos onde serão registrados os resultados e o grau de detalhamento dos dados desses arquivos.

- **Opções de finalização** – onde se determina o intervalo de tempo de parada entre as posições e opta-se pela unidade da taxa de dose, por calcular com a janela minimizada, encerrar o programa ao final dos cálculos e por mostrar os resultados normalizados para instalação com fontes de 37 PBq (1000 kCi).

- **Resultados** – onde, após o término dos cálculos, são exibidas, para os primeiros 400 pontos estudados, as taxas médias de dose e a dose total no tempo de permanência do produto dentro do irradiador, as taxas de dose máxima e mínima, com os respectivos totais e a razão entre elas.

O aplicativo gera dois relatórios para cada cálculo, ou seja, o relatório de cálculo e o conjunto de tabelas de dose, com vários graus de detalhamento.

O relatório de cálculo, com nome e localização definidos pelo aplicativo ou pelo usuário, tem sufixo “.cal” e fornece:

- O nome dos arquivos de fonte, de arranjo físico e de produto utilizados como base para os cálculos;
- A descrição, resumida ou detalhada, da geometria, ou arranjo físico, da irradiação, sempre indicando as posições independentes, ou não parametrizáveis;
- A descrição do produto, com os dados dos blocos e da caixa de contenção, se houver necessidade de destacá-la do produto, que compõem uma caixa de transporte;
- A descrição da fonte com a posição dos magazines e sua atividade calculada para uma data determinada pelo usuário e, opcionalmente, as atividades dos lápis montados em cada posição no magazine;
- A descrição de como foram determinados os pontos;
- O nome do arquivo onde estão registradas as tabelas geradas para estudo posterior com o uso de uma planilha de cálculo;

- A relação de pontos independentes, com sua localização, suas taxas médias de dose e doses totais, computadas para o processo como um todo;
- O ponto de dose máxima entre os definidos para estudo, com sua localização, taxa média de dose e dose total no processo;
- O ponto de dose mínima entre os estudados, com as suas características; e
- A relação entre as doses para esses dois últimos pontos.

As taxas médias de dose acima podem ser fornecidas em kGy/hora ou kGy/minuto, conforme opção feita pelo usuário. As doses totais podem ser fornecidas para qualquer intervalo de tempo de parada em cada posição, ou *timer setting*, com resolução de décimos de segundo.

Na geração do aplicativo considerou-se, ainda, que os pontos de dose máxima e de dose mínima obtidos podem não corresponder aos pontos reais de dose máxima e mínima. Ao se determinar os pontos a serem estudados, nem sempre são incluídos os pontos reais de doses máxima e mínima nos blocos. Isso ocorre principalmente em processos onde a irradiação não é totalmente simétrica, por causa do arranjo físico ou até mesmo por singularidades do produto irradiado, quando esses pontos não são conhecidos. Essas posições, no entanto, podem ser estimadas com boa precisão aumentando o número de pontos estudados. Portanto, a razão entre as doses dos pontos de máximo e de mínimo fornecidas pelo Cadgamma, ou até por ensaios dosimétricos, não devem ser confundidos com o fator de uniformidade de doses.

O segundo arquivo é composto de tabelas. Ele tem o nome e localização do relatório de cálculo, e sufixo “.tab”. Esse arquivo contém basicamente as tabelas de doses recebidas no processo de irradiação como um todo, isto é, a taxa média de dose e a dose total que cada ponto estudado recebe durante todo o processo. Como opção, o usuário pode determinar a inclusão das tabelas com as taxas de dose para cada posição dentro do irradiador. Esse arquivo foi idealizado para oferecer a possibilidade de análise mais profunda dos resultados utilizando uma planilha eletrônica, além de possibilitar a geração

de gráficos com a distribuição das doses. O arquivo possui tabelas de formato distinto para pontos independentes e para malhas de pontos.

Para cálculos realizados com pontos independentes, a tabela mostra, em cada linha, o posicionamento dos pontos, suas taxas de dose e, para o processo como um todo, suas doses totais.

Para malhas de pontos, a tabela está em formato de planilha, com a primeira coluna e a primeira linha fornecendo a cotas dos pontos que formam, com a terceira cota indicada no título da tabela, a identificação da posição desses pontos no bloco. A Tabela 1 é um exemplo de como as doses em pontos independentes são apresentadas, e a Tabela 2 exemplifica a planilha de doses em um plano. Essas tabelas são parte de arquivos gerados pelo Cadgamma, lidos pelo MSEXcel. Para malhas de pontos em três dimensões, o aplicativo gera tabelas referentes a todos os planos paralelos à fonte.

Tabela 1: Extrato de um relatório do Cadgamma, lido no MSEXcel

Resultados de cálculo para pontos independentes		
	Taxa de dose (kGy/hora)	Dose (kGy)
Ponto 1: (50.0, 150.0, 0.0):	3.529	15.291
Ponto 2: (150.0, 150.0, 0.0):	3.606	15.627
Ponto 3: (50.0, 150.0, 200.0):	4.045	17.530
Ponto 4: (150.0, 150.0, 200.0):	4.132	17.905
Ponto 5: (300.0, 150.0, 0.0):	3.628	15.721

Obs.: As taxas de dose e as doses têm a sua parte fracionária indicadas com três algarismos para contornar a definição local desse item (separação por ponto ou vírgula)

Tabela 2: Resultado de cálculo para uma malha 3 x 3 de um plano paralelo à fonte.

Plano 2 – profundidade: 200.0 mm				
	5.0 mm	250.0 mm	495.0 mm	Largura
590.0 mm	3.504	3.666	3.511	
300.0 mm	4.022	4.203	4.029	
10.0 mm	3.471	3.629	3.477	
Altura				

Obs.: As taxas de dose e as doses têm a sua parte fracionária indicadas com três algarismos para contornar a formatação local desse item (separação por ponto ou vírgula).

Os relatórios são gerados no formato texto, com caracteres padrão ASCII, ou *American Standard Code for Information Interchange*, e separação de colunas por tabulações. Os números estão em formato internacional, ou seja, utilizam o ponto como indicador decimal. Esse formato foi escolhido para que esses resultados possam ser lidos pela maioria dos editores de texto e planilhas de cálculo existentes no mercado. Para

facilitar o seu entendimento, é recomendável ler o arquivo de dados do cálculo, sufixo “.cam”, em um editor de texto e o arquivo de tabelas, sufixo “.tab”, com uma planilha eletrônica. As figuras 12 e 13 mostram exemplos de gráficos gerados com base nos arquivos de tabelas criados pelo Cadgamma.

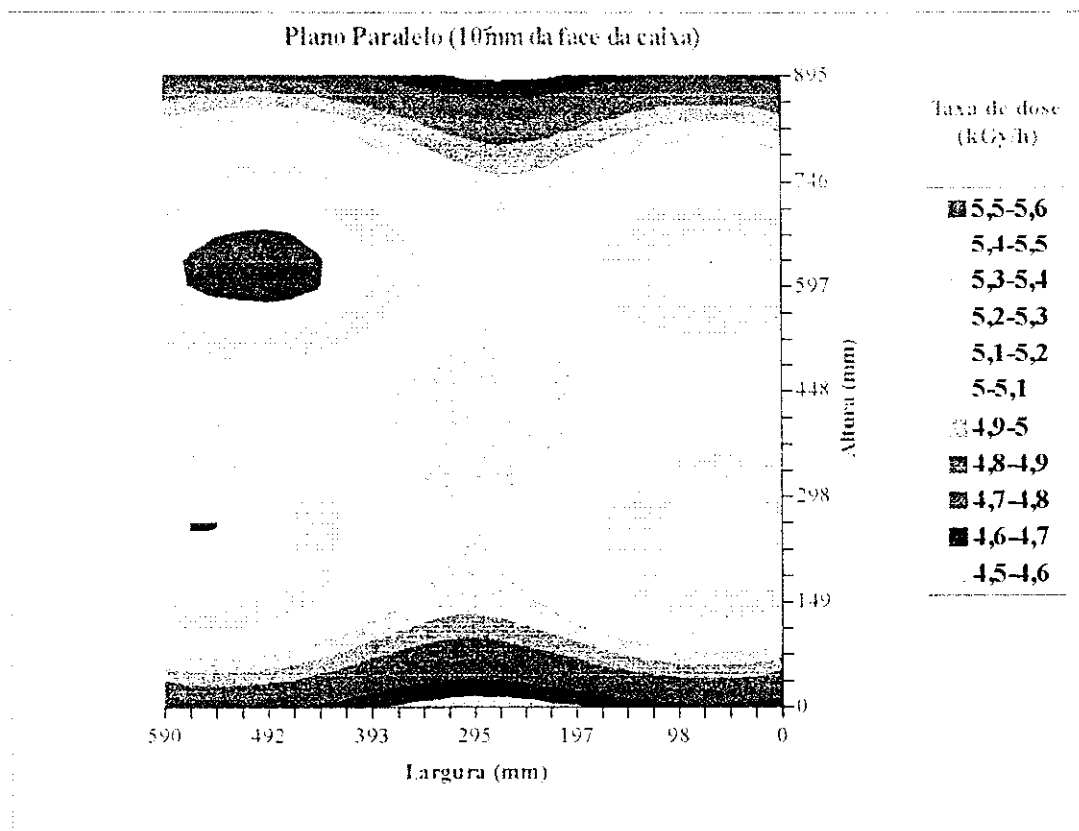


Figura 12: Estudo de um plano paralelo à fonte, a 10mm da face da caixa com dimensões internas de 895 mm de altura e 590 mm de largura (curvas isodose).

Esses gráficos são ilustrativos e foram gerados no Microsoft Graph 97, aplicativo incluído no pacote Microsoft Office 97, a partir do arquivo de tabelas gerado pelo Cadgamma. Eles podem ser gerados por qualquer aplicativo que gere gráficos em 3 dimensões a partir de uma planilha, como é o caso do MSEXcel, oferecendo a possibilidade de escolha ao usuário.

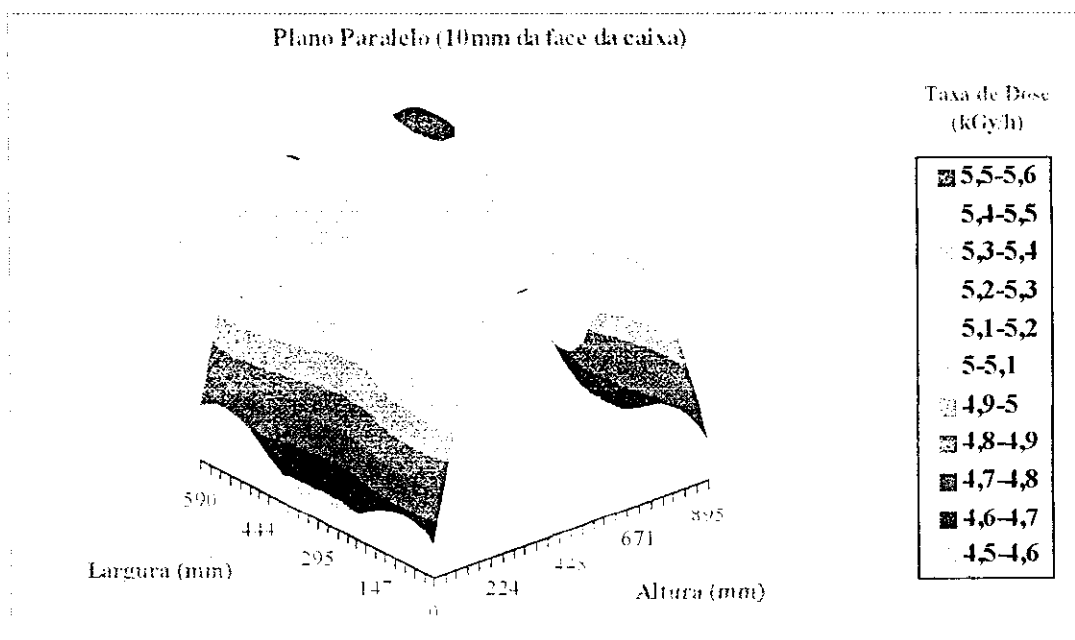


Figura 13: Representação em 3D das doses em um plano paralelo à fonte a 10mm da face da caixa com dimensões internas de 895 mm de altura e 590 mm de largura.

O aplicativo desenvolvido permite a gravação desses resultados em arquivos escolhidos pelo usuário, sendo que, para impedir a sobreposição acidental desses arquivos, ao término da seqüência de cálculo e gravação, sugere um nome que é derivado do original e acrescido de um número seqüencial. Se o nome escolhido já estiver sendo utilizado no diretório, o aplicativo indica o primeiro número para o qual isso não ocorra.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Ensaio realizados

Uma vez desenvolvido o programa, em sua versão para teste, isto é, ainda com algumas alterações a serem determinadas com o uso, foram realizados cálculos comparativos com relação ao aplicativo Microshield v.3.1^[5]. Também foi realizada uma comparação entre os cálculos e os dados disponíveis para o irradiador panorâmico do CTR, com fonte de ^{60}Co .

Para simular um irradiador simples, foi montado um ensaio envolvendo 4 caixas de papelão contendo isopor e o irradiador panorâmico.

A validação do método adotado no aplicativo desenvolvido foi realizada com base em levantamentos dosimétricos realizados em uma indústria, sediada no Estado de São Paulo, que utiliza os raios gama do ^{60}Co para a esterilização de diversos tipos de produtos médico-hospitalares.

A flexibilidade do aplicativo desenvolvido foi verificada com levantamento dosimétrico específico, realizado em condições não convencionais de operação, em uma instalação comercial em fase de testes operacionais, também sediada nesse Estado.

3.2. Utilização de dosímetros PMMA

Os dosímetros tipo PMMA, tendo como material básico o polimetacrilato de metila e um componente sensível à radiação ionizante, são largamente utilizados nas aplicações comerciais pelo seu baixo custo e facilidade de uso. Esses dosímetros normalmente são

fabricados em placas de espessura controlada, que são cortadas na forma de pequenos retângulos, sendo que a maior parte dos dosímetros tipo PMMA encontrados no mercado já vêm nessa forma e são embalados individualmente em envelopes feitos com um laminado contendo poliéster, alumínio e polietileno.

Para a leitura das doses, são utilizados espectrofotômetros que medem a transmitância, ou seja, a razão entre a energia luminosa que incide no dosímetro e a energia que passa por ele, e converte esse valor para absorvância pela equação^[14]:

$$A = -\log(T),$$

onde **A** é a absorvância e **T** é a transmitância medida.

Embora o termo absorvância seja definido para a energia que é efetivamente absorvida pelo material e a transmitância também leve em conta a luz que é espalhada na passagem pelo material, para a maior parte das medições envolvidas, considera-se que a energia luminosa espalhada é desprezível^[14], o que justifica a utilização do termo.

Tendo sua absorvância específica, ou seja, sua capacidade de atenuar a transmissão de luz por unidade de espessura, crescente com a exposição à radiação ionizante, os dosímetros tipo PMMA, também conhecidos como dosímetros acrílicos, podem ser utilizados para identificar doses a partir de algumas centenas de Gy até algumas dezenas de kGy.

São fabricados dosímetros com espessuras diversas, tipos e concentrações diferentes de componentes de modo a assegurar que as absorvâncias decorrentes das doses a serem medidas possam ser lidas com boa resolução nos espectrofotômetros. Assim, por exemplo, são encontrados dosímetros acrílicos comerciais para intervalos de 100 Gy a 3 kGy, 1 kGy a 30 kGy, e 5 kGy a 50 kGy, sendo que os dosímetros preparados para medir doses mais baixas costumam ser mais espessos que os demais. Para esses dosímetros são determinados os comprimentos de onda onde a variação da absorvância em relação às doses medidas é mais adequada. Assim, por exemplo, dosímetros PMMA vindos de um lote podem ser utilizados para mais de um intervalo de doses, tendo um comprimento de onda específico para cada um desses intervalos.

Dividindo a absorvância pelo valor da espessura do dosímetro, obtém-se a absorvância específica do dosímetro, em cm^{-1} , e, com o uso de curvas de calibração previamente levantadas, obtém-se o valor da dose recebida.

Além desse método, utilizado por alguns fabricantes de dosímetros na elaboração de suas curvas de calibração, pode ser adotada a medida da variação da absorvância específica, em relação ao dosímetro não irradiado. Nesse caso, é descontada a absorvância do branco, ou dosímetro não irradiado. Adota-se, então, como absorvância do branco, a leitura de uma amostra não irradiada do lote do qual serão retirados os sensores, considerando que as variações de espessura e composição dos dosímetros de um lote podem ser consideradas desprezíveis.

O método a ser utilizado para a medida da dose depende da forma como foram levantadas as curvas de referência, geradas com o uso de fontes gama previamente calibradas por métodos considerados padrão. Entre esses métodos, citam-se o uso de calorímetros e a utilização dos dosímetros com solução de sulfato ferroso, conhecido como Fricke^[15].

As curvas de referência para cada lote de dosímetros PMMA são levantadas pelo fabricante, e é recomendável refazê-las com o equipamento de leitura, método e condições de medida adotados localmente para minimizar os erros na determinação do valor das doses, pois variações nas condições de trabalho, em relação às condições de calibração, e diferenças na resolução do comprimento de onda dos equipamentos podem determinar diferenças nas medidas de absorvância do dosímetro.

Na prática, pode ser adotada a curva de calibração do fabricante para a maior parte das aplicações, considerando-se que os desvios decorrentes da leitura do espectrofotômetro são menores que os desvios tolerados para o valor das doses medidas. Porém, esse procedimento implica na calibração freqüente dos espectrofotômetros, de modo a assegurar uma maior exatidão na absorvância lida.

3.3. Comparação de resultados para doses no ar

Testes comparativos foram realizados com o uso do aplicativo Microshield v.3.1, cuja cópia foi cedida ao Instituto para avaliação. O aplicativo Microshield calcula a dose em um ponto por vez e foi desenvolvido para uso no sistema operacional MSDOS, já obsoleto.

Para esses cálculos, no caso do Microshield, a fonte foi descrita como tendo comprimento de 200 mm e diâmetro de 8,1 mm, com capa de aço de 1,95 mm de espessura, totalizando o diâmetro de 12 mm, além de outro tubo com diâmetro externo de 101,6 mm e espessura de 3,175 mm de aço, completando a construção da fonte. Esses dados correspondem à configuração do irradiador panorâmico do TE. A atividade da fonte, utilizada para os cálculos era de 6,99 GBq (1890 Ci).

No caso do Cadgamma, a fonte é considerada linear, ou seja, um cilindro com diâmetro nulo, com 200 mm de comprimento, sendo que o raio do lápis foi somado à espessura do tubo externo, constituindo assim a blindagem ao redor da fonte. Os pontos para o cálculo foram definidos a partir de 5mm de distância da parede do tubo, separados 50 mm entre si.

Nos dois aplicativos não são levadas em consideração a influência das irradiações de segunda ordem devidas ao espalhamento (*back scattering*) nas paredes da sala ou na mesa do irradiador panorâmico. As paredes estão suficientemente distantes para que o efeito da presença das mesmas seja desprezível, mas é esperado um pequeno aumento nas doses lidas nos pontos mais inferiores por influência do espalhamento da radiação na superfície da mesa.

A Tabela 3 mostra a comparação acima descrita. Os cálculos foram comparados ainda com os dados disponíveis sobre a distribuição de doses no irradiador panorâmico do TE, conforme apresentado na Tabela 4. Esses dados foram levantados na época da troca da fonte do irradiador.

Tabela 3: Cálculos realizados pelo aplicativo Microshield e pelo Cadgamma.

Distância ^(*) (mm)	Microshield ± 5% (Gy/h)	Cadgamma ± 5% (Gy/h)	Diferença (%)
57,8	3681	3778	2,60
107,8	1442	1441	-0,07
157,8	749	746	-0,40
207,8	453	451	-0,44
257,8	302	300	-0,66
307,8	215	213	-0,93
357,8	160	159	-0,63
407,8	124	123	-0,80
457,8	99	98	-1,01
507,8	81	80	-1,23
557,8	67	67	0,00
607,8	56	56	0,00
657,8	48	48	0,00

^(*) Distância calculada entre o centro do lápis (fonte) e o ponto estudado, no nível central da fonte.

Tabela 4: Dados do irradiador panorâmico e cálculo pelo Cadgamma

Distância ^(*) (mm)	Estimativa ± 10% (Gy/h)	Cadgamma ± 5% (Gy/h)	Diferença (%)
57,8 (0cm)	1862	3778	103
107,8 (5cm)	967	1441	49
157,8 (10cm)	587	746	27
207,8 (15cm)	419	451	7,6
257,8 (20cm)	317	300	-5,4
307,8 (25cm)	239	213	-10,9
357,8 (30cm)	176	159	-9,7
407,8 (35cm)	145	123	-11,7
457,8 (40cm)	111	98	-11,7
507,8 (45cm)	91	80	-12,1
557,8 (50cm)	75	67	-12,1
607,8 (55cm)	67	56	-16,4
657,8 (60cm)	55	48	-12,7

^(*) Distâncias tomadas nas referências da mesa do irradiador, com as cotas usadas na dosimetria do irradiador panorâmico, ou as referências da mesa, indicadas entre parênteses.

3.4. Simulação de um processo de irradiação

Para a validação do Cadgamma com um processo de irradiação, levando-se em conta a irradiação nas várias posições em que uma caixa de transporte contendo o material a ser irradiado ocupa no processo, foram realizados ensaios, no irradiador ^{60}Co , tipo panorâmico do IPEN – Centro de Tecnologia da Radiação - CTN, onde se simula um pequeno irradiador com um único lápis.

Os ensaios foram realizados com caixas de papelão de 345 mm de largura, 490 mm de altura e 335 mm de profundidade, contendo isopor de densidade média de 0,018 kg/l ou 0,018 g/cm³ e utilizando-se dosímetros de polimetacrilato de metila, ou PMMA, conhecidos comercialmente como *Amber 3042*, fornecidos pela Harwell Dosimeters Ltd., da Inglaterra, cuja faixa de resposta à dose absorvida é de 1 kGy a 30 kGy. Os sensores são pré envelhecidos pelo fabricante e selados em envelopes de polietileno aluminizado, e foram utilizados dessa forma durante a irradiação.

Para a leitura desses dosímetros, utilizou-se o espectrofotômetro UV-1601 fabricado pela Shimadzu, no Japão, e ajustado para medir a absorção de luz nos comprimentos de onda de 603 nm e de 651 nm, conforme instruções do fabricante.

O uso do irradiador panorâmico, com atividade próxima de 6,99 GBq (1890 Ci) na época do ensaio, implica em taxas de dose suficientemente baixas para que não se observe aumento significativo de temperatura durante a irradiação, preservando assim as características desejadas para a interpretação dos resultados.

Por outro lado, para que as doses obtidas tenham um valor dentro da faixa desejada, no caso, com doses mínimas em torno de 2 kGy, foram necessárias 3 horas de irradiação em cada posição dentro do irradiador.

O ensaio foi realizado com o uso de 4 caixas de papelão contendo isopor, simulando um pequeno irradiador de 2 posições e 2 passagens de cada lado da fonte, frente e verso, num total de 8 posições de irradiação.

Em duas dessas caixas, foram colocados 27 dosímetros no seu interior, em posições preestabelecidas, conforme esquema da Figura 14. Os dosímetros foram identificados com números, de 1 a 9 por plano vertical, e por letras, A, B e C correspondendo ao plano frontal, do meio e posterior, respectivamente. Assim, para cada plano, os pontos 1, 2 e 3 ficam em cima, 4, 5 e 6 no meio e os pontos 7, 8 e 9 no plano inferior. Na caixa 1, foram colocados outros dosímetros a cerca de 25 mm das posições 4, 5 e 6 nos 3 planos.

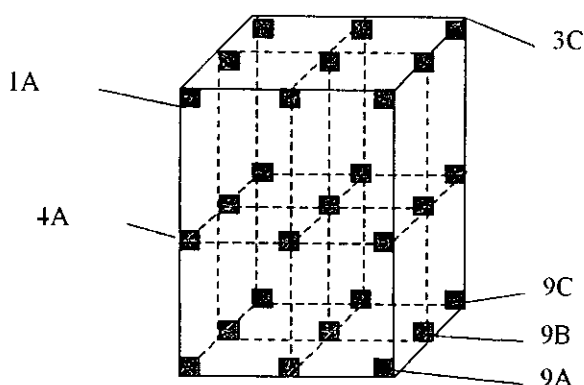


Figura 14: Distribuição de dosímetros no isopor, dentro da caixa de papelão.

Esses dosímetros, por estarem contidos em envelopes e por serem utilizadas estruturas de isopor, não puderam ser fixados nas posições ideais no produto irradiado, como as arestas e vértices.

Uma vez que o aplicativo tem a capacidade de calcular as doses em pontos avulsos, esse recurso se mostrou valioso para a verificação das medidas nas posições reais dos dosímetros no arranjo experimental. A Figura 15 mostra as posições das caixas em cada etapa da irradiação, no irradiador panorâmico do TE. Deve se notar que ao passar por trás da fonte do irradiador, a face oposta da caixa passa a ser a mais próxima da fonte.

Para a simulação com o aplicativo desenvolvido, foi utilizada a densidade média da caixa, em um bloco único de produto, que foi de $0,032 \text{ g/cm}^3$.

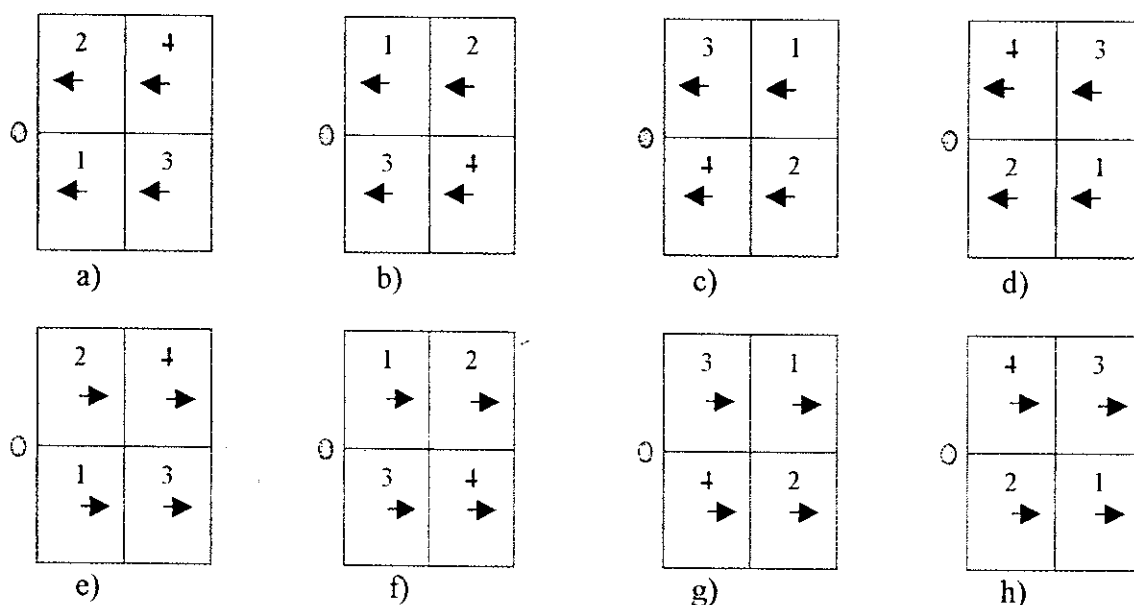


Figura 15: Disposição esquemática das caixas, vista de topo, simulando a passagem pela frente da fonte, a) a d), ponto à esquerda das caixas e, a passagem por trás da fonte, e) a h). As setas indicam a posição do plano A.

Na análise das medidas, percebe-se que as taxas de dose obtidas nos dosímetros superiores eram maiores que nos dosímetros inferiores correspondentes, embora se esperasse que, devido à presença do espalhamento da radiação na superfície da mesa, essa situação fosse invertida. Com isso, levantou-se a hipótese de que a fonte poderia estar trabalhando um pouco acima do centro da caixa. Isso pode ser verificado, através do detalhamento das taxas de dose no plano paralelo frontal do isopor, que indicou que uma distribuição vertical de doses como a verificada poderia ocorrer com o centro da fonte deslocado cerca de 20 mm, ou 2 cm, acima do centro da caixa. Com o uso do aplicativo desenvolvido, novos cálculos foram realizados estudando essa hipótese, sendo que os resultados aparentemente a confirmam.

Os resultados obtidos por esse ensaio estão discriminados nas Tabelas 5 e 6. Nelas, a primeira coluna indica as posições dos dosímetros, a segunda coluna indica as doses medidas, a terceira apresenta os cálculos do Cadgamma com a fonte na posição da montagem, e os dados da última coluna calculados para simular a situação hipotética acima descrita. Para os dosímetros que ocupavam posições simétricas foi considerada a média das taxas de dose medidas. Os desvios indicados nessas tabelas, de $\pm 20\%$ para as medições realizadas foram admitidos por serem utilizadas as tabelas fornecidas pelo fabricante. Os desvios referentes aos cálculos são atribuídos às simplificações consideradas no processo de cálculo, discriminadas na seção do 2.1.3, totalizando 5%.

Tabela 5: Taxas de dose na caixa 1

Posição	Dose Medida $\pm 20\%$ (kGy/h)	Cálculo Original $\pm 5\%$ (kGy/h)	Cálculo Hipotético $\pm 5\%$ (kGy/h)
7B 9B	0,731	0,701	0,675
2B	0,740	0,740	0,775
8B	0,752	0,740	0,706
1B 3B	0,815	0,701	0,743
7A 9A 7C 9C	0,887	0,864	0,795
8A 8C	0,910	0,854	0,799
4B 6B	1,054	0,969	0,977
2A 2C	1,150	0,854	0,912
5B	1,250	1,004	1,001
1A 3A 1C 3C	1,240	0,864	0,945
5A 5C	1,289	1,397	1,390
4A' 6A'	1,540	1,610	1,602
4A 6A	1,950	1,992	1,974
D _{max} /D _{min}	2,67	2,84	2,92

Obs.: Os dosímetros indicados com o apóstrofo foram colocados internamente ao isopor. A densidade média do produto foi de 0,032 g/cm³.

Tabela 6. Taxas de dose na caixa 4.

Posição:	Dose Medida $\pm 20\%$ (kGy/h)	Cálculo Original $\pm 5\%$ (kGy/h)	Cálculo Hipotético $\pm 5\%$ (kGy/h)
7B 9B	0,781	0,701	0,675
8B	0,783	0,740	0,706
2B	0,860	0,740	0,775
1B 3B	0,861	0,701	0,743
7A 9A 7C 9C	0,919	0,864	0,795
8A 8C	0,919	0,854	0,799
4B 6B	1,057	0,969	0,977
2A 2C	1,099	0,854	0,912
1A 3A 1C 3C	1,164	0,864	0,945
5B	1,167	1,004	1,001
5A 5C	1,570	1,397	1,390
4A 4C 6A 6C	1,978	1,992	1,974
D _{max} /D _{min}	2,53	2,84	2,92

Obs.: A densidade média do produto foi de 0,032 g/cm³.

3.5. Análise dos dados de um irradiador já instalado

Para a validação do método utilizado no aplicativo, foi feito o acompanhamento no levantamento dosimétrico em uma instalação industrial para irradiação de produtos médico-hospitalares, sediada no País, e a simulação das doses nos pontos monitorados do produto irradiado.

Essa instalação trabalha com caixas de transporte padronizadas, com paredes de papelão de 3,2 mm de espessura e 600 mm de largura, 500 mm de profundidade e 914 mm de altura como dimensões externas. Esse sistema mantém 24 caixas no recinto de irradiação, em frente à fonte, sendo 12 de cada lado. Durante o processo de levantamento dosimétrico, foram irradiadas 13 caixas com 27 dosímetros cada uma, tipo PMMA com faixa de leitura de 5 kGy a 50 kGy, sendo que o lote de dosímetros havia sido calibrado, na empresa, para fornecer os resultados referentes ao material irradiado. As doses em cada um dos pontos foi determinada pela média das medidas nessas 13 caixas.

Para atingir os propósitos do programa, algumas características geométricas do irradiador foram tomadas por aproximação, caso dos dados da estrutura de sustentação das caixas de transporte e da estrutura de proteção da fonte. O erro estimado para essas medidas, porém, é menor que 5%, conforme indicado na seção 2.1.3. Essa é, também, a estimativa de variação dos dados do material irradiado.

Para o posicionamento das caixas em relação à fonte, foi utilizada a distribuição parametrizada, ou seja, como se estivessem alinhadas e igualmente espaçadas em cada uma das direções. Na prática, existe uma pequena variação nessas posições, o que se nota com a existência de vãos variáveis entre caixas vizinhas. Isso se deve, provavelmente, ao fato de o material das caixas não ser suficientemente rígido para garantir a regularidade na distribuição das caixas existente no recinto de irradiação. Essa variação, por ser pequena e aleatória, influi pouco nos resultados, pois as medidas de dose foram avaliadas pela média de 13 levantamentos. Os tempos de movimentação totalizam menos de 5% do tempo total de permanência das caixas dentro do irradiador.

O posicionamento dos centros dos dosímetros nas caixas, para fins de cálculo, foi fundamental para a definição exata das doses calculadas. Isso é atribuído ao gradiente na distribuição das doses ao redor de alguns pontos, que chega a ser de mais de 7% para 10 mm de deslocamento. Por essa razão, as cotas das posições dos dosímetros nas caixas de transporte foram determinadas, para o aplicativo, com estimativa de erro menor que 5 mm. Somando-se a essa variação a influência da precisão do espectrofotômetro, estima-se em 10% o erro admissível para as medidas.

A Tabela 7 mostra a comparação entre os resultados obtidos com as medições realizadas e os cálculos efetuados pelo aplicativo. Nessa tabela, os resultados foram apresentados em ordem crescente de doses absorvidas e o posicionamento dos dosímetros foi identificado conforme a Figura 14, presente na seção 3.4.

Tabela 7: Comparação entre os dados reais e os calculados pelo aplicativo

Posição	Dose Medida $\pm 10\%$ (kGy)	Dose Calculada $\pm 5\%$ (kGy)	Diferença (%)
A8	25,99	25,57	-1,6
A2	27,04	25,88	-4,3
C8	27,45	26,55	-3,3
B8	27,60	26,88	-2,6
C2	27,67	26,99	-2,5
B2	28,02	27,24	-2,8
B7	28,16	28,66	1,8
B9	28,56	28,78	0,8
A5	28,75	28,82	0,2
A9	28,88	28,92	0,1
A7	28,94	28,85	-0,3
B1	29,00	29,78	2,7
B3	29,13	29,86	2,5
A1	29,66	29,97	1,1
A3	29,69	30,04	1,2
C5	29,71	30,00	1,0
B5	29,80	30,34	1,8
C7	30,05	29,69	-1,2
C3	30,18	31,18	3,3
C1	30,32	31,07	2,5
C3	30,39	29,94	-1,5
B4	31,53	32,27	2,3
B6	31,61	32,38	2,4
A6	32,13	32,85	2,2
A4	32,44	32,78	1,0
C4	32,86	33,81	2,9
C6	33,21	34,00	2,4
D_{\max}/D_{\min}	1,28	1,31	2,3

Obs: A densidade média do produto foi de $0,1 \text{ g/cm}^3$.

O diagrama resultante dessa tabela é apresentado na Figura 16.

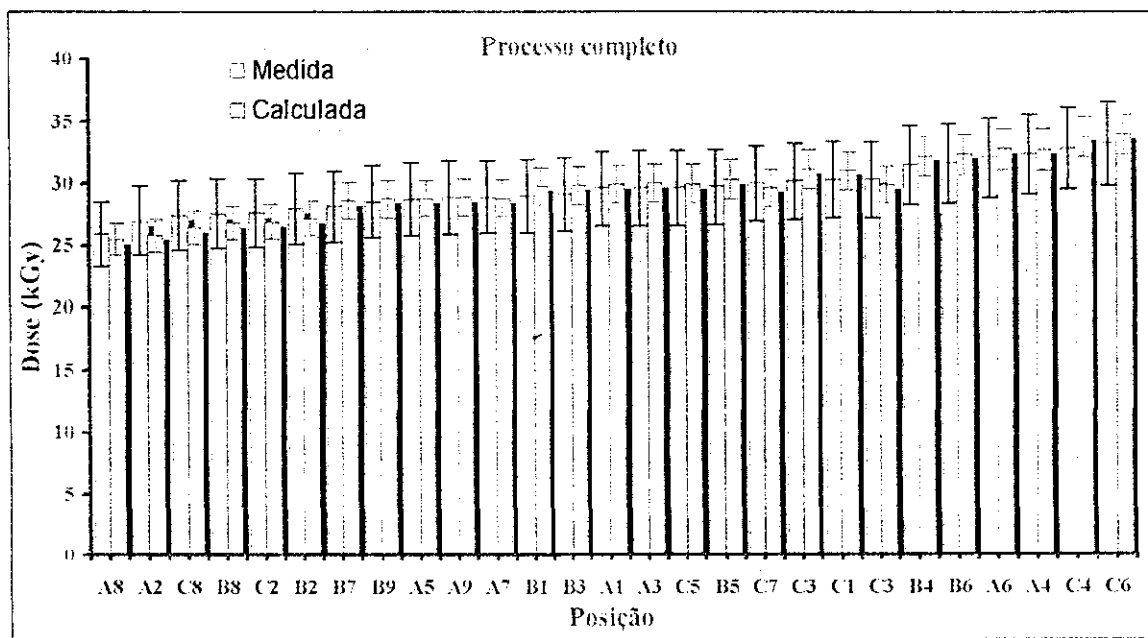


Figura 16: Comparação entre os resultados da medição e os valores calculados pelo Cadgamma.

O aplicativo também é capaz de determinar os pontos exatos de dose máxima e mínima no produto para o levantamento do fator de uniformidade de doses. Procedendo essa pesquisa com o cálculo das doses para 1331 pontos no produto irradiado (11 x 11 x 11 pontos), verifica-se que o ponto de dose máxima não coincide com nenhum dos pontos propostos para esse levantamento dosimétrico e a dose nesse ponto é maior, em cerca de 10%, que a dose máxima obtida entre os pontos estudados. O ponto de taxa de dose mínima, segundo a simulação realizada, coincidiu com a posição do dosímetro que recebeu a dose mínima.

Esse fato não indica problemas no procedimento adotado para o levantamento do fator de uniformidade de doses, pois deriva de procedimentos adotados mundialmente^[15]. Porém, para se obter o fator de uniformidade de doses conforme a sua definição clássica, é necessária a determinação do ponto de dose máxima em todo o volume estudado.

A Figura 17 mostra a relação entre as posições dos dosímetros e o ponto de dose máxima. Os pontos do cálculo, bem como os dosímetros, estão localizados internamente à caixa, diretamente em contato com o material analisado.

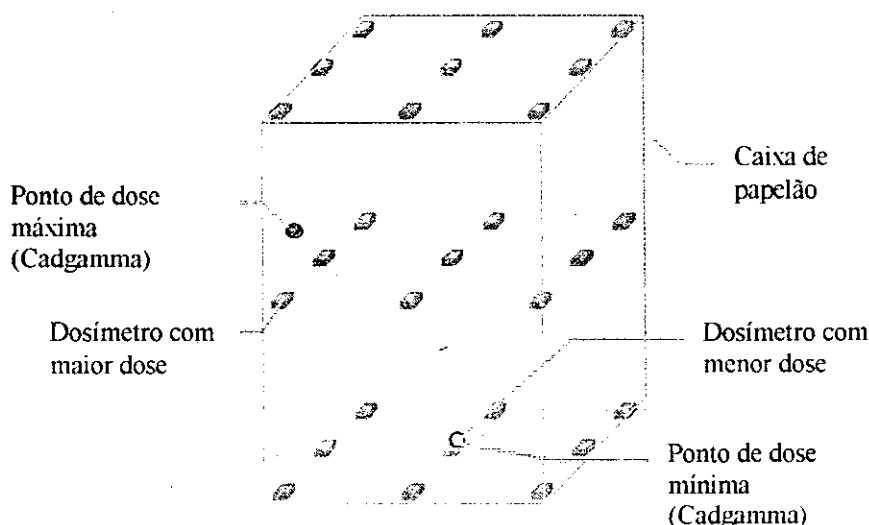


Figura 17: Caixa de transporte com os dosímetros montados interiormente, destacando o ponto de dose máxima, o dosímetro com maior dose, o ponto de dose mínima e o dosímetro com menor dose.

3.6. Análise dos dados de um irradiador em fase de testes operacionais

O teste da flexibilidade do aplicativo desenvolvido foi realizado com a simulação dos ensaios iniciais de uma instalação comercial de esterilização, com fonte de ^{60}Co , em fase de implantação. Essa instalação possui capacidade para irradiar materiais acondicionados em estrados e, inicialmente, irá operar com passagens em um único nível vertical, sendo que o material beneficiado tem duas passagens de cada lado da fonte.

Embora os cálculos realizados pelo Cadgamma sejam voltados para processos com a instalação tendo todas as posições de irradiação dentro da sala da fonte ocupadas pelo material beneficiado, o acompanhamento dos ensaios iniciais, com o uso de poucas caixas de transporte, foi viabilizado pelos recursos do aplicativo, e o uso do MSExcel para a análise dos relatórios emitidos.

Para esse ensaio, foram utilizados apenas quatro estrados montados em posições consecutivas no irradiador, portando duas caixas de material cada. Essas caixas possuem a largura do estrado e a sua profundidade foi dimensionada de tal forma que permita a inversão de suas posições no estrado, obtendo assim uma redução significativa no fator de uniformidade de doses. Sete dessas caixas foram preenchidas com material de teste, com

densidade de $0,20 \text{ g/cm}^3$, e uma das caixas do quarto estrado foi preenchida parcialmente. Esse ensaio foi planejado para ter a inversão das posições das caixas como parte do processo de irradiação, obtendo-se assim a irradiação chamada de semi-espelhada. Em cada fase, o conjunto ocupou apenas 9 posições de irradiação com a fonte na posição de trabalho, sendo que as posições intermediárias foram ocupadas com a fonte mergulhada na piscina. A movimentação dos estrados entre as posições de irradiação ocupou cerca de 11% do tempo total do processo.

A Figura 18 mostra o esquema das posições estáticas de radiação e, em destaque, as posições que o material ocupou durante o ensaio, com a fonte em posição de irradiação. As outras posições foram ocupadas com a fonte recolhida.

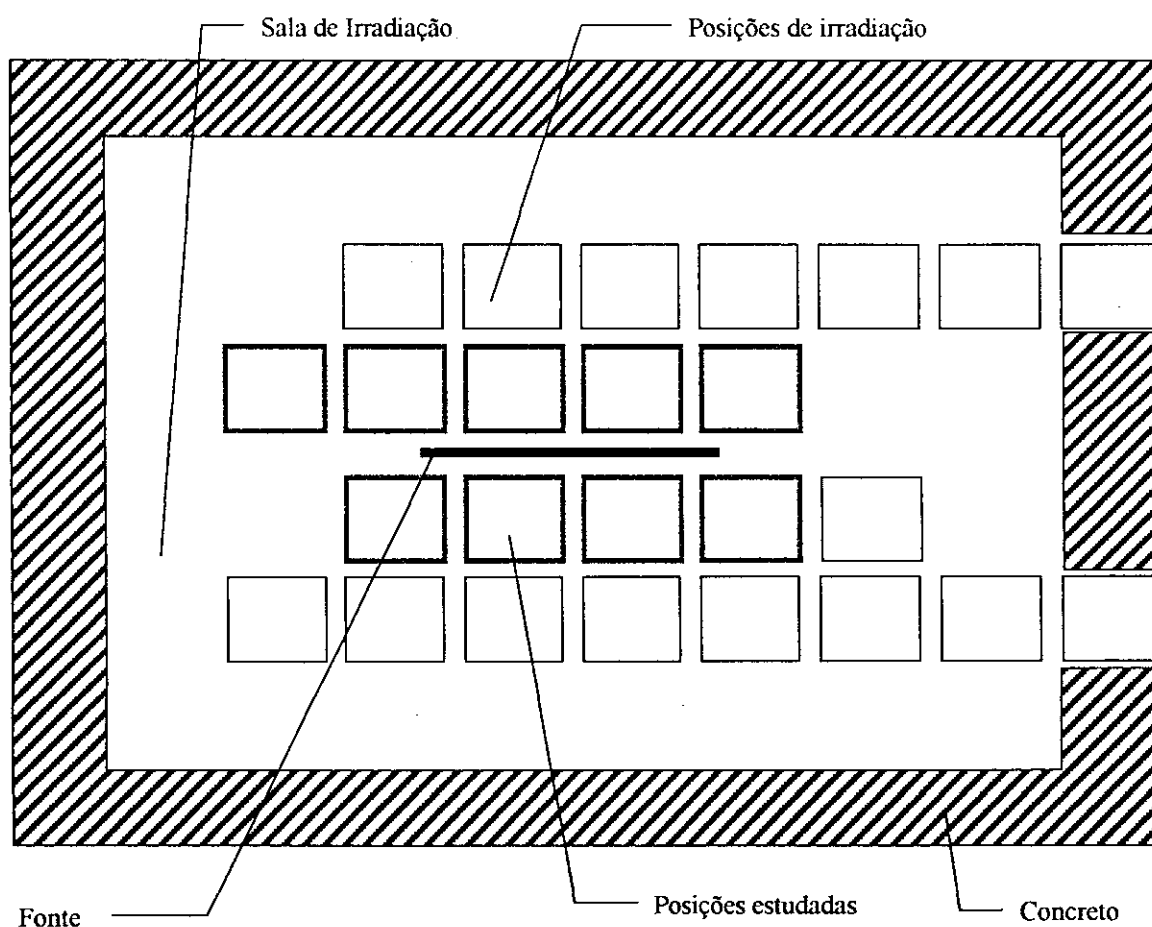


Figura 18: Esquema da sala de irradiação, com as posições que podem receber a irradiação da fonte, destacando as efetivamente utilizadas para o ensaio.

Para o ensaio, as duas caixas do segundo estrado foram monitoradas em 27 pontos, de acordo com a Figura 14. Foram utilizados dois dosímetros em cada um desses pontos,

sendo um do tipo *Amber 3402*, para doses entre 1 kGy e 30 kGy, e um do tipo *Red 4304*, para doses entre 5 kGy e 50 kGy, fornecidos pela Harwell Dosimeters Ltd., da Inglaterra, com as devidas tabelas de conversão de absorvância específica em cm^{-1} para doses em kGy. Os sensores foram colocados nas caixas de forma a ficarem paralelos à fonte.

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos com os dosímetros *Amber 3402* para a caixa 1 do segundo estrado. A Harwell Dosimeters Ltd. forneceu também as tabelas de conversão das absorvâncias específicas, dadas em cm^{-1} , em doses recebidas, em kGy, para leituras do dosímetro *Amber 3402* no comprimento de onda de 603 nm, indicado para doses de 1 kGy a 15 kGy mas, verificando que as doses obtidas estiveram acima de 13 kGy, optou-se pelo uso exclusivo do comprimento de onda de 651 nm na avaliação dos resultados com esse tipo de dosímetro. A Tabela 9 mostra os resultados referentes à caixa 2 do segundo estrado. As Figuras 19 e 20 mostram os resultados das Tabelas 8 e 9, respectivamente, para os pontos de dose abaixo de 30 kGy, limite de resposta do dosímetro utilizado.

Os erros admitidos para as doses medidas são de 15%, pois foram utilizadas as tabelas de conversão de absorvância específica em dose fornecidas pelo fabricante e também foram levadas em conta as dificuldades no posicionamento dos dosímetros e a precisão do equipamento de medida. Para a simulação, os erros estimados são de, no máximo, 5%, conforme indicado na seção 2.1.3.

Tabela 8: Resultados obtidos com a primeira fase da esterilização, para a caixa 1.

Posição do Dosímetro	Dose medida $\pm 15\%$ (kGy)	Dose calculada $\pm 5\%$ (kGy)	Diferença
1 A1	29,76	29,34	-1,4%
1 A2	27,44	25,54	-6,9%
1 A3	29,57	27,75	-6,1%
1 A4	> 30	> 30	-
1 A5	> 30	> 30	-
1 A6	> 30	> 30	-
1 A7	> 30	> 30	-
1 A8	28,42	26,18	-7,9%
1 A9	> 30	28,93	-
1 B1	20,58	19,62	-4,6%
1 B2	18,73	17,51	-6,5%
1 B3	20,40	18,73	-8,2%
1 B4	22,79	23,76	4,3%
1 B5	20,18	20,86	3,3%
1 B6	22,94	22,83	-0,5%
1 B7	20,40	19,19	-5,9%
1 B8	16,64	17,06	2,5%
1 B9	20,87	18,43	-11,7%
1 C1	16,46	16,40	-0,4%
1 C2	14,52	14,81	2,0%
1 C3	16,44	15,34	-6,7%
1 C4	17,42	18,13	4,0%
1 C5	15,46	16,18	4,7%
1 C6	17,46	17,07	-2,2%
1 C7	15,57	15,66	0,6%
1 C8	13,22	14,06	6,3%
1 C9	15,21	14,76	-2,9%

Obs.: Os valores maiores que 30 kGy estão fora do intervalo de sensibilidade recomendado para os dosímetros *Amber 3402*. A densidade média do produto foi de 0,20 g/cm³

Tabela 9: Resultados obtidos com a primeira fase da esterilização, para a caixa 2.

Posição do Dosímetro	Dose medida $\pm 15\%$ (kGy)	Dose calculada $\pm 5\%$ (kGy)	Diferença
2 A1	16,37	16,40	0,2%
2 A2	14,36	14,80	3,1%
2 A3	16,30	15,33	-6,0%
2 A4	17,73	18,13	2,2%
2 A5	15,51	16,16	4,2%
2 A6	18,27	17,07	-6,6%
2 A7	15,86	15,66	-1,2%
2 A8	13,27	14,04	5,8%
2 A9	15,68	14,76	-5,9%
2 B1	21,15	18,82	-11,1%
2 B2	17,60	15,80	-10,3%
2 B3	20,56	17,37	-15,5%
2 B4	23,84	22,21	-6,8%
2 B5	19,43	17,89	-7,9%
2 B6	23,36	20,90	-10,5%
2 B7	20,65	18,28	-11,5%
2 B8	16,30	15,10	-7,4%
2 B9	21,09	17,26	-18,2%
2 C1	29,00	29,35	1,2%
2 C2	25,78	19,91	-22,7%
2 C3	> 30	26,21	-
2 C4	> 30	> 30	-
2 C5	> 30	27,07	-
2 C6	> 30	> 30	-
2 C7	> 30	> 30	-
2 C8	> 30	19,90	-
2 C9	> 30	28,75	-

Obs.: Os valores maiores que 30kGy estão fora do intervalo de sensibilidade recomendado para os dosímetros *Amber 3402*. A densidade média do produto foi de 0,20 g/cm³

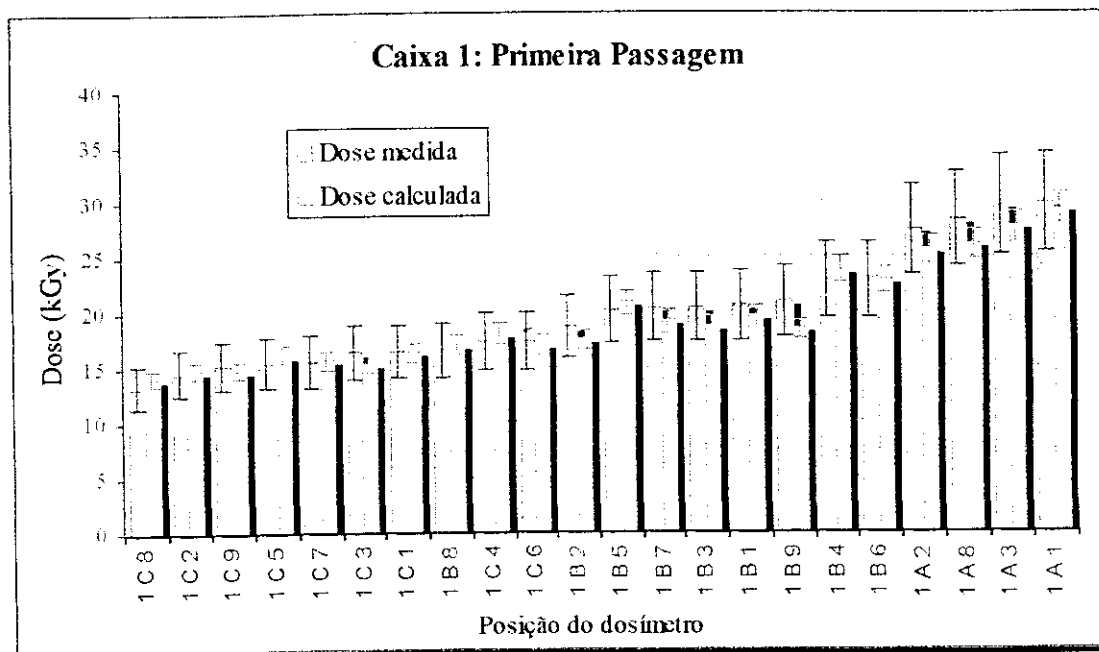


Figura 19: Dose medida e dose calculada para a caixa 1, na primeira passagem pelo irradiador, para pontos com valores de dose abaixo de 30 kGy.

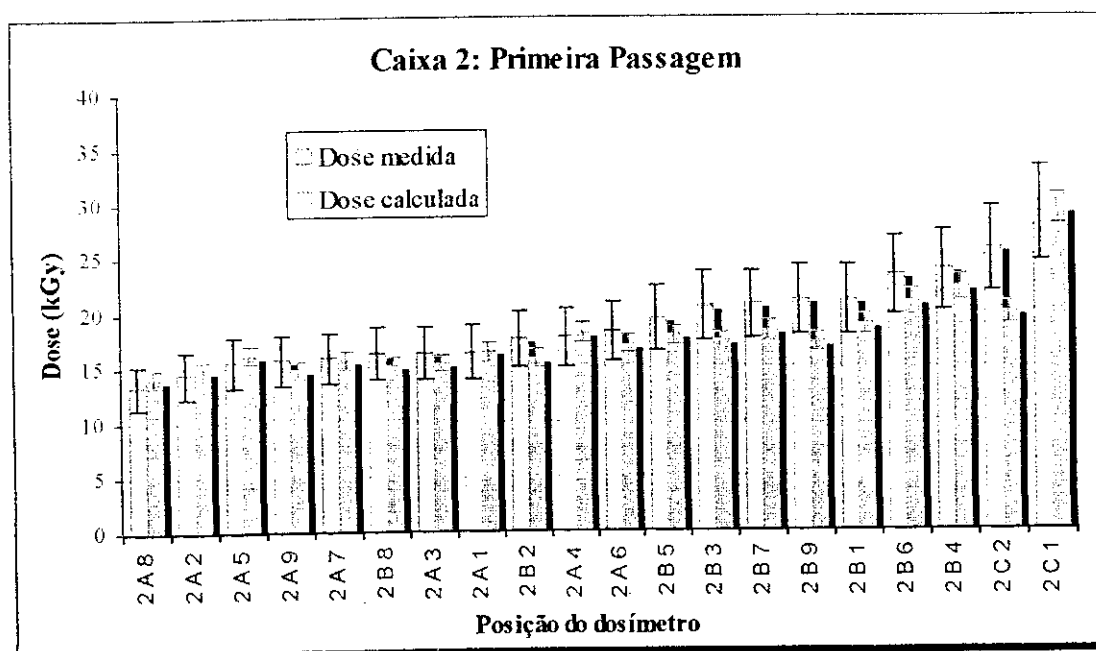


Figura 20: Dose medida e dose calculada para a caixa 2, na primeira passagem pelo irradiador, para pontos com valores de dose abaixo de 30 kGy.

As Tabelas 10 e 11 mostram os resultados obtidos com o processo completo, ou seja, integrando as doses da primeira etapa e da irradiação após a mudança das posições das caixas no estrado, mantendo os dosímetros tipo *Red 4304* nas posições da etapa anterior, de modo a integrar as doses recebidas no processo completo.

Tabela 10: Resultados obtidos com o processo completo, para a caixa 1.

Posição do Dosímetro	Dose medida $\pm 15\%$ (kGy)	Dose calculada $\pm 5\%$ (kGy)	Diferença
1 A1	46,3	45,7	-1,4%
1 A2	40,6	39,2	-3,4%
1 A3	41,7	43,4	4,1%
1 A4	> 50	> 50	-
1 A5	48,9	> 50	-
1 A6	> 50	> 50	-
1 A7	48,4	> 50	-
1 A8	39,3	39,2	-0,3%
1 A9	47,3	43,9	-7,0%
1 B1	34,6	38,4	11,0%
1 B2	30,6	33,3	8,9%
1 B3	34,8	36,1	3,8%
1 B4	38,8	46,0	18,3%
1 B5	35,4	38,7	9,3%
1 B6	39,6	43,7	10,5%
1 B7	34,9	37,5	7,2%
1 B8	28,8	32,2	11,5%
1 B9	34,4	35,7	3,7%
1 C1	37,3	45,6	22,1%
1 C2	32,5	34,5	6,3%
1 C3	38,6	41,5	7,5%
1 C4	47,6	> 50	-
1 C5	37,1	42,6	15,0%
1 C6	47,3	> 50	-
1 C7	39,8	> 50	-
1 C8	30,4	33,6	10,5%
1 C9	41,0	43,7	6,5%

Obs.: Os campos vazios indicam operações entre valores acima do limite dos dosímetros envolvidos. A densidade média do produto foi de $0,20 \text{ g/cm}^3$

Tabela 11: Resultados obtidos com o processo completo, para a caixa 2.

Posição do Dosímetro	Dose medida $\pm 15\%$ (kGy)	Dose calculada $\pm 5\%$ (kGy)	Diferença
2 A1	36,4	45,7	25,5%
2 A2	34,1	39,2	14,9%
2 A3	36,5	43,4	18,9%
2 A4	44,8	> 50	-
2 A5	40,8	> 50	-
2 A6	44,8	> 50	-
2 A7	37,7	> 50	-
2 A8	33,6	39,2	16,5%
2 A9	37,9	43,9	16,0%
2 B1	34,9	38,4	10,1%
2 B2	30,3	33,3	9,8%
2 B3	37,3	36,1	-3,3%
2 B4	40,2	46,0	14,3%
2 B5	35,1	38,7	10,3%
2 B6	40,7	43,7	7,4%
2 B7	35,5	37,5	5,4%
2 B8	29,3	32,2	9,8%
2 B9	34,0	35,7	4,9%
2 C1	44,1	45,6	3,4%
2 C2	36,2	34,5	-4,5%
2 C3	46,9	41,5	-11,5%
2 C4	> 50	> 50	-
2 C5	45,5	42,6	-6,3%
2 C6	> 50	> 50	-
2 C7	> 50	> 50	-
2 C8	38,9	33,6	-13,6%
2 C9	50,0	43,7	-12,6%

Obs.: Os campos vazios indicam operações entre valores acima do limite dos dosímetros envolvidos. A densidade média do produto foi de $0,20 \text{ g/cm}^3$

As Figuras 21 e 22 representam os resultados das Tabelas 10 e 11, respectivamente, para os pontos com dose dentro dos limites de resposta do dosímetro tipo *Red 4304*.

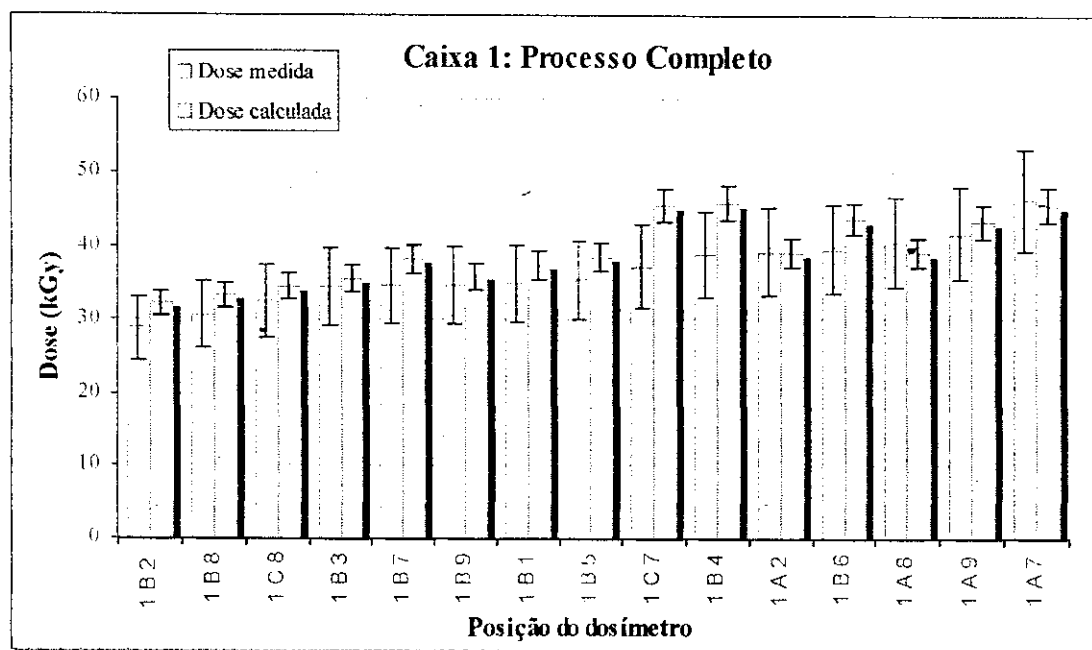


Figura 21: Dose medida em confronto com a dose calculada pelo Cadgamma, resultados para a caixa 1.

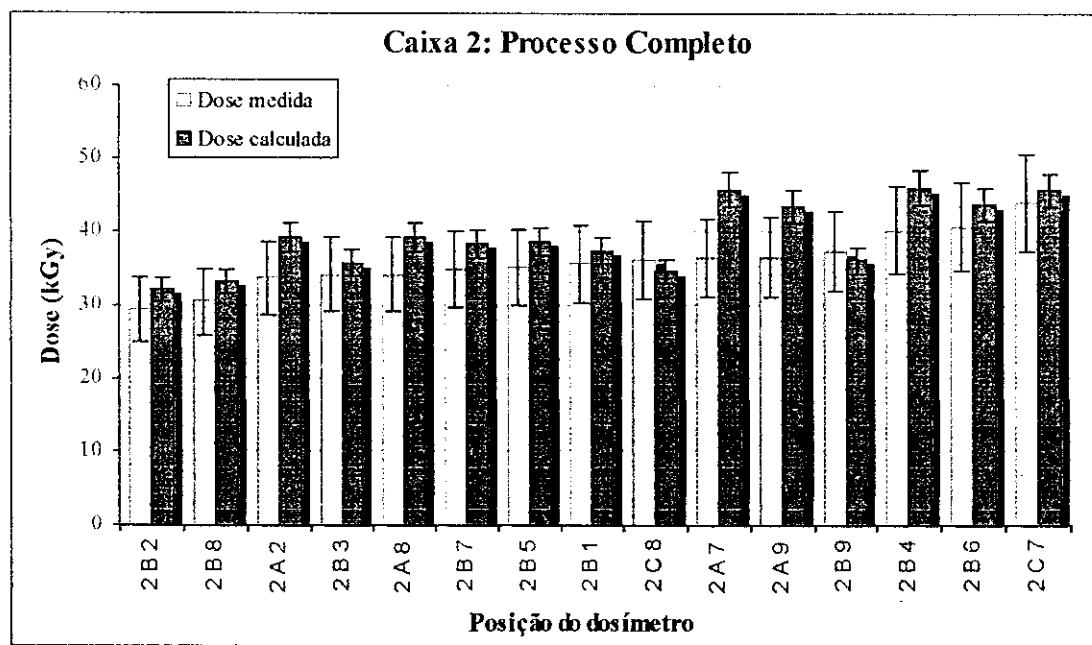


Figura 22: Dose medida em confronto com a dose calculada pelo, resultados para a caixa 2.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O cálculo realizado pelo aplicativo Cadgamma fornece resultados muito próximos aos do Microshield^[5], conforme demonstra a tabela 3. As prováveis causas das diferenças são o fato de o aplicativo Microshield não calcular os dados para a energia exata do fóton emitido, mas pela média de resultados calculados para as energias aproximadas de 1.0 MeV e 1.5 MeV e também o método de cálculo utilizado para o cálculo do fator de *buildup* no Microshield, que se utiliza da equação e dos coeficientes de Taylor ^[9, 10 e 11] na sua determinação, enquanto que o Cadgamma utiliza diretamente os valores da tabela de fatores de *buildup* ^[11], conforme indicado na seção 2.1.3.

Ao se comparar os resultados dos cálculos efetuados no Cadgamma com os dados disponíveis sobre o levantamento dosimétrico do irradiador panorâmico do TE, observa-se que os valores calculados não condizem com o mapeamento dosimétrico efetuado para os pontos próximos à fonte, fornecendo valores muito mais altos que os medidos. Isso pode ser explicado, em parte, pelo fato de que os cálculos, tanto no aplicativo Cadgamma como no Microshield, levam em consideração fontes com distribuição uniforme de ⁶⁰Co. Os desvios encontrados nessa tabela passam a ser menores para distâncias acima de 200mm, como esperado, sendo que o efeito do espalhamento da radiação gama na mesa, desprezado no caso de uso de fatores de *buildup* para meios infinitos, deve aumentar as doses para pontos próximos da sua superfície. Esse comportamento reforça a suspeita de que a distribuição de ⁶⁰Co não seja constante no lápis do irradiador panorâmico.

Segundo foi observado no trabalho de Hristova ^[13], a variação das doses ao longo do comprimento da fonte é muito grande para pequenas distâncias, se houverem lacunas e não uniformidades na distribuição do material radioativo ao longo do comprimento útil do lápis, sendo que essa influência diminui com o aumento da distância.

Para simular um processo simples de irradiação, com um único lápis, foi utilizado o irradiador panorâmico do CTR e 4 caixas contendo isopor, conforme indica a seção 3.4. Os dados obtidos nos ensaios foram comparados com os cálculos realizados pelo Cadgamma,

conforme mostram as tabelas 5 e 6. Os resultados do cálculo efetuados pelo Cadgamma estão dentro do intervalo de erro das medidas, sendo que as razões entre as doses máxima e mínima dos pontos estudados na simulação do processo de irradiação estão dentro do esperado.

A maioria dos valores calculados está abaixo dos valores medidos, embora dentro dos limites de tolerância. Isso pode ser explicado, em parte, pelo fato de se considerar a caixa de papelão e o isopor como um bloco único, ignorando o fato de terem densidades muito diferentes, de forma a obter resultados com os dados de entrada simplificados.

Nota-se ainda que as doses correspondentes à parte superior das caixas, medidas nos pontos 1, 2 e 3 dos três planos, são maiores que as doses recebidas na base, onde estão os pontos 7, 8 e 9. Isso contraria as expectativas, pois a radiação incidente na mesa do irradiador deveria resultar em um ligeiro incremento nas doses da parte inferior da caixa.

O comportamento das doses pode ser explicado pelo fato de haver uma maior concentração de ^{60}Co na parte superior do lápis, ou o centro do comprimento útil da fonte não estar nivelado exatamente no centro geométrico da caixa. Isso é verificado com a aproximação dos resultados obtida com o cálculo levando-se em consideração o deslocamento do lápis da fonte, 20 mm para cima da posição original, em que as doses obtidas nos cálculos passam a ter um comportamento mais parecido com o das medidas.

Embora mais investigações devam ser realizadas com respeito à fonte do irradiador panorâmico do TE, permite-se concluir que o aplicativo fornece resultados próximos à realidade no que tange à razão entre as doses máxima e mínima em um sistema de irradiação, além de fornecer subsídios para o detalhamento no comportamento das doses no produto e investigação de possíveis anomalias.

A validação do método foi realizada comparando-se os valores simulados pelo Cadgamma com os do levantamento dosimétrico de um processo de esterilização com raios gama do ^{60}Co , que faz parte da cadeia de produção de uma indústria instalada no País, conforme indicado na seção 3.5. Os resultados, apresentados na Tabela 7 e Figura 14, demonstram que o aplicativo forneceu doses muito próximas aos do mapeamento

dosimétrico apresentado, com erros abaixo de 5% em relação ao valor medido. O desvio padrão ficou em 1,2%, reforçando a validação do aplicativo.

As relações entre as doses máxima e mínima, 1,28 nas medições e 1,33 no cálculo, mostram apenas 3,9% de diferença entre a simulação e a dosimetria. As diferenças encontradas podem ser atribuídas principalmente ao cálculo do fator de *buildup*, cujos valores, obtidos das tabelas contidas na publicação da *American Nuclear Society*^[5], são determinados para meios considerados infinitos.

O efeito da não homogeneidade dos lápis ao longo de seu comprimento é minimizado pelo fato de termos um número grande de lápis, distribuídos no *rack* da fonte, contribuindo para a dose nos pontos estudados. Assim, embora possam haver lápis de ^{60}Co próximos a alguns pontos das caixas vizinhas da fonte, a presença dos outros lápis da fonte, por estarem mais distantes e contribuindo significativamente para a totalização das doses nesses pontos, contribui para minorar esse efeito.

Considerando as variações inerentes ao processo industrial, com tolerâncias maiores que os erros obtidos, e as limitações impostas para seguir a proposição de trabalhar com dados simplificados, os resultados obtidos nessa validação demonstram que o método adotado fornece resultados com precisão suficiente para o tipo de aplicação a que se destina.

Os ensaios de flexibilidade de resposta do programa, com a simulação da irradiação de um produto ocupando posições independentes de irradiação, descritos na seção 3.6, forneceram as Tabelas 8, 9, 10 e 11 e as Figuras 19, 20, 21 e 22.

As dificuldades encontradas no levantamento das doses e no posicionamento dos dosímetros no produto, levaram a incertezas maiores nas medidas desse ensaio em relação ao ensaio anterior. Os resultados foram conclusivos no que tange à simulação do irradiador de grande porte, dentro dos padrões de erro aceitos em uma instalação comercial, principalmente ao se levar em consideração a densidade elevada dos produtos utilizados nos ensaios, mas, como esperado, demonstraram um desvio maior que o do estudo de validação do aplicativo. Para a primeira passagem pelo irradiador, os erros passaram a ser

de 4% em média, com 3% de desvio padrão. As Figuras 19 e 20 possibilitam a visualização do comportamento dos erros.

Para o processo completo, os erros passam a ser de 8% em média, com 5% de desvio padrão. Esperava-se haver doses similares em relação aos planos equivalentes nas caixas 1 e 2, o que não ocorreu. O comportamento atípico dos resultados das medições de doses no processo completo, caracterizado pelas diferenças obtidas em relação as somas das doses medidas nos planos citados, pode ser atribuído aos eventuais deslocamentos da posição dos dosímetros tipo *Red 4304* durante a retirada dos dosímetros tipo *Amber 3402* entre a primeira e a segunda passagem do processo. Assim sendo, esses resultados podem estar comprometidos. Não obstante, as diferenças nas doses medidas em relação às calculadas são aceitáveis se levarmos em conta as fontes de desvio assinaladas na seção 3.6, como demonstram as Figuras 21 e 22.

Comparando os testes realizados na seção 3.5 e na seção 3.6, é possível verificar que os erros obtidos são maiores para a simulação do irradiador comercial. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de o irradiador instalado na indústria trabalhar com um número maior de lápis, tendo os magazines praticamente cheios de fontes ativas, enquanto que os magazines do irradiador comercial, ainda em fase de testes e sem concluir a otimização da distribuição, terem menos de 15% das posições ocupadas por lápis contendo o ^{60}Co . Assim, os lápis ativos ficam muito separados entre si, gerando altos gradientes de fluxo nas proximidades da fonte. Esse efeito diminui com a distância, motivo pelo qual grande parte dos trabalhos de dosimetria em irradiadores encontrados na literatura ^[16, 17, 18, 19, 20] relatam ensaios realizados com os produtos distantes da fonte.

Cabe ressaltar que a utilização deste aplicativo permitiu uma redistribuição dos módulos de fontes, diminuindo os gradientes de fluxo de radiação da instalação e aumentando a eficiência do irradiador comercial.

Como, na prática, aproximar o produto das fontes é um fator importante para a eficiência do irradiador, o espaçamento entre os lápis passou a ser da ordem da distância mínima. Com isso, um pequeno deslocamento do dosímetro em relação à posição determinada causa uma grande variação na dose medida. Nos irradiadores com alta taxa de

ocupação de lápis nos magazines, há pouco espaço entre os lápis com ^{60}Co , fazendo com que o gradiente encontrado seja menor, o que resulta em medidas mais consistentes.

Os tempos de deslocamento entre posições também influenciaram para aumentar a diferença entre as doses calculadas e as medidas, sendo menores que 5% do tempo total para o ensaio da seção 3.5 e cerca de 11% para o ensaio com o irradiador comercial descrito na seção 3.6. A irradiação durante a movimentação do material tende a aproximar as doses ao longo da largura das caixas, principalmente nos planos mais próximos da fonte, e isso não é considerado na versão atual do aplicativo desenvolvido.

Deve-se observar ainda que todas as simulações realizadas pelo Cadgamma, com pelo menos 27 pontos estudados em um bloco de produto irradiado, tiveram tempo de processamento inferior a 5 minutos em um microcomputador com processador Intel Pentium 100. Para um usuário experiente, outros 5 minutos podem ser necessários para a introdução de todos os dados da fonte, arranjo e produto, sendo que esse tempo diminui sensivelmente se for necessária apenas a troca de alguns dados para, por exemplo, realizar pesquisas de influência de um único parâmetro no comportamento das doses.

A utilização de aplicativos desenvolvidos para cálculos gerais, como é o caso do Microshield, gastaria muito mais tempo. Por exemplo, para o cálculo de doses em um único ponto do irradiador, para um único lápis, esse aplicativo gasta cerca de 3 segundos no computador acima mencionado, sem levar em consideração o tempo de intervenção do usuário, que deve alterar os dados dos materiais entre o ponto estudado e o lápis, pois eles variam de ponto para ponto e anotar os resultados.

Considerando que a irradiação seja totalmente simétrica, seria necessário calcular as doses para apenas um oitavo dos pontos, extrapolando os resultados para as outras partes. Assim mesmo, tendo 27 pontos por bloco e 24 posições de irradiação, para cada lápis seria necessário calcular as doses para, pelo menos, 81 pontos. Com 100 lápis, o número de interações chegaria a 8100, consumindo mais de 7 horas, apenas de processamento. Tomando como base uma média, otimista, de 20 segundos para a identificação e alteração dos dados para os cálculos, e outros 7 segundos, em média, para transcrever os resultados em uma planilha, chega-se a 70 horas corridas para uma única simulação, obtendo resultados muito próximos aos do Cadgamma. E esse tempo pode ser

ainda 8 vezes maior para sistemas não simétricos. Como 90% desse tempo é atribuído à intervenção do usuário, um computador mais rápido não causaria grande redução nesses intervalos. O Microshield pode ainda oferecer o cálculo de doses com a fonte como se fosse uma placa homogênea, o que pode levar o cálculo de doses nos 81 pontos a menos de 1 hora, mas isso implica em considerar uma tolerância maior para os erros dos resultados, principalmente se a fonte possuir distribuição heterogênea de atividades dos lápis.

5. CONCLUSÕES

O aplicativo desenvolvido pode ser utilizado como ferramenta de simulação de processos de irradiação em instalações comerciais, com algumas restrições para sistemas onde as distâncias entre as fontes seladas sejam da ordem das distâncias mínimas entre o produto e a fonte.

Os resultados obtidos nos ensaios envolvendo irradiadores comerciais, mostram que a precisão e a exatidão das respostas do Cadgamma são suficientes para a finalidade a que se destina, sendo que os erros de cálculo foram menores que os admitidos pelo método de medida disponível.

O desenvolvimento do Cadgamma foi voltado à otimização dos tempos de cálculo e simplificação dos dados de entrada, mantendo a precisão dentro dos limites aceitáveis, ou seja, dentro dos limites de erro tolerados para o processo de irradiação. Assim sendo, embora sua utilização reduza o número de ensaios de ajuste de um processo de irradiação, o Cadgamma não tem como finalidade a substituição completa desses ensaios.

Pela relação obtida entre a velocidade e a precisão de resposta, o aplicativo desenvolvido, entre outras capacidades, pode ser utilizado para, com os dados da dosimetria, investigar possíveis anomalias nos sistemas instalados, e orientando os ensaios dosimétricos, oferece uma previsão inicial para o ajuste do intervalo entre deslocamentos desses sistemas, diminuindo bastante o número de ensaios necessários para defini-lo.

Para atender a requisitos onde se exija uma precisão maior nos resultados de simulações, sem grandes restrições quanto ao tempo de resposta, ainda é aconselhável a adoção de aplicativos que utilizem o método de Monte Carlo, como o EGS4 e o MCNP.

O Cadgamma deve evoluir para atender a solicitações que não estavam previstas na versão atual, mantendo como base o método de cálculo utilizado. A impressão direta dos

resultados, bem como a geração de gráficos, continuará a ser realizada através de aplicativos secundários, como o MSWrite e o MSEXcel.

Entre as sugestões de novas opções a serem oferecidas nas próximas versões do aplicativo, sugerem-se:

- O cálculo das doses com o material durante o deslocamento, pois a versão atual assume que esse período é muito pequeno em relação ao tempo de parada nas posições de irradiação;
- A adaptação do aplicativo para simulação de irradiadores com fonte de geometria cilíndrica, à exemplo de irradiadores tipo Gammacell;
- A simulação de fontes com lápis colocados na posição horizontal; e
- A simulação de irradiações em condições especiais, como o cálculo de doses com fonte e produto beneficiado dentro da água ou em outro meio diferente do ar.

Pode-se utilizar esse aplicativo na otimização de instalações de irradiação e no estudo de novas configurações, mas é imprescindível o ensaio em condições reais para que os resultados obtidos sejam verificados. Como exemplo, pode-se simular o uso de fontes com distribuição vertical de lápis, dispostos horizontalmente, e sistemas de transporte contínuo ao invés da adoção de posições estáticas de irradiação. A implantação da instalação de irradiação multipropósito do IPEN poderá servir de subsídio para esse tipo de estudo, entre outros, e pode dar subsídios a projetos de irradiadores mais eficientes no futuro.

6. ANEXOS

6.1. Anexo 1: Cálculo de π pelo método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo, cujo nome deriva do principado famoso pelo uso de jogos de azar, tem aplicação generalizada. Baseados no uso de números randômicos e dados estatísticos para resolver problemas, os métodos de Monte Carlo são técnicas estocásticas aplicadas em quase tudo, desde cálculos de comportamento econômico a física nuclear, no que concerne a fluxo de ocorrências.

O uso do método de Monte Carlo para modelar problemas físicos permite a avaliação de sistemas complexos, o que não seria possível de outra forma. Resolver equações que descrevem a interação entre dois átomos é relativamente simples, mas descrever a interação entre centenas de milhares de átomos é virtualmente impossível. No método de Monte Carlo, um sistema grande é amostrado em um número razoável de configurações randômicas e os dados obtidos podem descrever o sistema como um todo.

A determinação de π pelo método de Monte Carlo pode ser feita por vários algoritmos e, entre eles, a determinação da área de um círculo por integração de eventos aceitos e rejeitados parece ser a de mais simples compreensão.

Considerando um círculo com raio r , como na Figura 23, obtemos como área:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (1)$$

E, para o quadrado de lado $L = 2r$, a área obtida será:

$$A_q = L^2 = 4r^2 \quad (2)$$

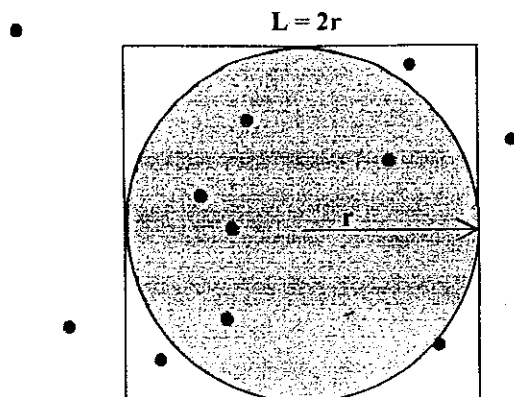


Figura 23: Círculo de raio unitário contido em um quadrado de lado $2r$. Os pontos vermelhos exemplificam os pontos atingidos pelo atirador de dardos.

Utilizando como alvo a Figura 23, e tendo um atirador de dardos com péssima pontaria, a relação entre os pontos atingidos dentro do círculo, n_c , e os pontos atingidos no quadrado, n_q , seriam proporcionais às suas respectivas áreas:

$$\frac{n_c}{n_q} \cong \frac{A_c}{A_q} = \frac{\pi}{4} \Rightarrow \pi \cong 4 \cdot \frac{n_c}{n_q} \quad (3)$$

Naturalmente, quanto mais tentativas o atirador fizer, maior será a precisão no valor de π obtido.

Deve-se observar que o atirador de dardos não pode melhorar a pontaria, qualquer que seja o número de tentativas, para manter a característica aleatória dos pontos atingidos.

Para simular essa situação em um computador, pode-se utilizar uma rotina de geração de números randômicos, uma rotina para contagem de eventos e o teorema de Pitágoras. Gerando dois números randômicos entre -1 e 1 , e atribuindo um deles à ordenada, a , e outro à abscissa, b , obtém-se um ponto no plano xy . Nessa simulação, todos os pontos gerados pertencem ao quadrado de lado 2 , também centrado na origem. Se esse ponto estiver dentro do círculo, o valor da equação:

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4)$$

será menor que 1 , se estiver fora, o resultado será maior que a unidade e, se estiver no perímetro, será igual a 1 . A Figura 24 ilustra essa simulação.

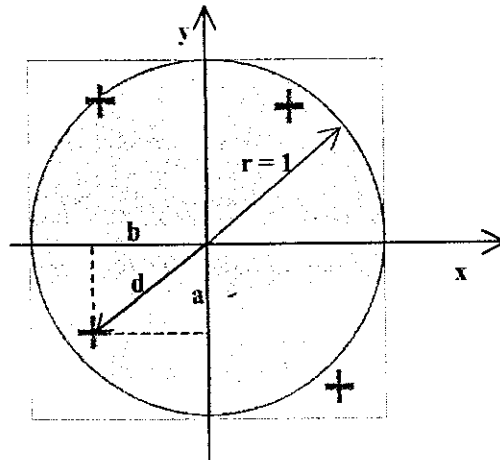


Figura 24: Círculo com centro na origem dos eixos cartesianos e os pontos com coordenadas geradas aleatoriamente.

Adicionando, no contador, uma unidade para cada ponto cuja distância à origem seja menor ou igual a 1, podemos aplicar a equação (3), tendo n_c como o total de pontos pertencentes ao círculo e n_q como o total de pontos gerados.

Para minimizar o número de instruções dadas ao computador, utiliza-se o mesmo princípio acima com o quadrante positivo do plano cartesiano, conforme a Figura 25, e a geração aleatória de números entre 0 e 1.

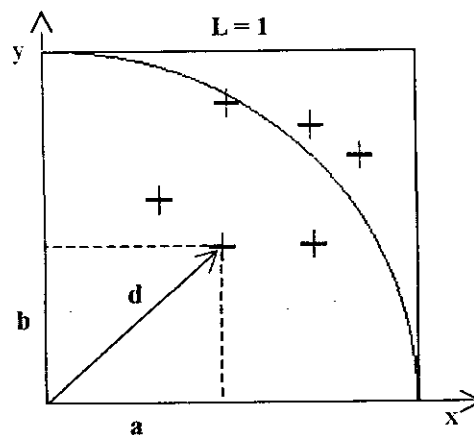


Figura 25: Quadrado contendo $\frac{1}{4}$ do círculo centrado na origem, de raio igual ao comprimento dos lados.

Esse exemplo, apesar de relativamente simples, exige um número grande de pontos gerados para se obter o valor de π com algumas casas decimais. O método utilizado para a geração de números randômicos também é decisivo para a exatidão do valor encontrado.

Por outro lado, tendo um número suficientemente grande de simulações, pode-se obter o valor de π com a precisão máxima para o computador no qual ele esteja sendo gerado.

O método de Monte Carlo viabiliza a determinação de padrões de comportamento amplamente aceitos em várias áreas. Na área nuclear, esse método é utilizado também para o levantamento de tabelas de *Buildup* para energias e materiais em que não é possível, técnica ou economicamente, levantar esses parâmetros em laboratório. No entanto, esses resultados exigem o conhecimento profundo do comportamento estatístico dos materiais envolvidos e um número alto de interações, o que torna demorada a obtenção dos resultados acima mencionados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Technical and Economic Comparison of Irradiation and Convencional Methods*. 1988 (IAEA – Technical Document No. 454, Vienna, 1988)
- 2 - ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF MEDICAL INSTRUMENTATION / INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, *Sterilization of Health Care Products – Requirements for Validation and Routine Control – Radiation Sterilization*, 1994. (AAMI/ISO - 11137)
- 3 - LANGLEY, ROGER; EDWARDS, REX; REUTER, GERD. Specifying a Gamma- Irradiation Plant for Safe and Cost-Effective Sterelization. *Medical Device Technology* no. 0075, (1994).
- 4 - REMER, A., *DOSKMI²* - Computer-Aided Evaluation of Radiation Field in Gamma- Irradiation Plants, *Kernenergie*, v. 29, p. 88-91 (1986).
- 5 - NEGIN, C.A., Microshield - A Microcomputer Program for Analyzing Dose Rate and Gamma Shielding, *American Nuclear Society*, v. 53, p. 421-422 (1986)
- 6 - NELSON, W.R., HIRAYAMA, H and ROGERS, D.W.O. *The EGS4 Code System*, Standford University, Standford, 1985
- 7 - BRIESMEISTER, J. F., *About MCNPTM* [on line], University of California – Los Alamos National Laboratory, Sep. 1987 [cited Dec. 1999], avaiable from Internet <http://www-xdiv.lanl.gov/XCI/PROJECTS/MCNP/about.html> .
- 8 - CURZIO, OSVALDO A. A Theoretical Model to Improve the Design of Gamma Irradiators. *Radiat. Phys.Chem.*, v. 47, n. 6, p. 899-902 (1996).

9 - JAEGER, R. G. - *Shielding Fundamentals and Methods*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1968. (Engineering Compendium on Irradiation Shielding, v. 1)

10 - AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, *New Gamma Ray Buildup Factor Data for Point Kernel Calculations*. (ANS-6.4.3 Standard Reference Data, Oak Ridge, 1991)

11 - WOLLER, T.A., *The Basics of Monte Carlo Simulations*, [on line], University of Nebraska-Lincoln Physical Chemistry Lab (Chem 484), Spring 1996 [cited Dec.1999], available from Internet <http://wwitch.unl.edu/zeng/joy/mclab/mcintro.html>.

12 - MICHIELI, I., The use of an Expanded Polynomial Orthogonal Set in Approximation to Gamma-Ray *buildup* Factor Data, *Nuclear Science and Engineering*, v.117, p. 110-120 (1994)

13 - HRISTOVA, M.O., A Device for Measuring the Dose Rate of High Activity Gamma Sources, *High Dose Dosimetry for Radiation Processing*, 1991, (Proceedings of an International Symposium on High Dose Dosimetry for Radiation Processing – IAEA), p.101-106, Nov. 1991

14 - DIXON, H. B. F., Absorbency or Attenuance, *Biochemical Education* , no. 20, p. 108-108 (1992)

15 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY *Manual of Food Irradiation Dosimetry*. 1977. (IAEA Technical Reports Series No. 178, Vienna, 1977).

16 - MACLAUGHLIN, W.L. et alli - *Dosimetry for Radiation Processing*. London – UK:Taylor & Francis, 1989.

17 - ESPINOSA, J. ; Dosimetria:Desarrollo Y Experiencia em Chile, *High Dose Dosimetry for Radiation Processing*, 1991, (Proceedings of an International Symposium on High Dose Dosimetry for Radiation Processing – IAEA), p. 235-252, Nov. 1991

18 - HADJINIA, A; SOHRABPOUR, M., Commissioning Dosimetry and Intercomparison Studies at the Gamma Irradiation Centre, *High Dose Dosimetry for Radiation Processing*, 1991, (Proceedings of an International Symposium on High Dose Dosimetry for Radiation Processing – IAEA), p. 385-396, Nov. 1991

19 - DORDA, E.M., Dosimetric Methods and Quality Control of Industrial Irradiation Plants in Argentina, *High Dose Dosimetry for Radiation Processing*, 1991, (Proceedings of an International Symposium on High Dose Dosimetry for Radiation Processing – IAEA), p. 349-356, Nov. 1991

20 - VILLALPANDO, G.P., Use of computer code for dose distribution studies in a cobalt 60 industrial irradiator, 1992. *8. International Meeting on Radiation Processing*, (Radiation processing: conference abstracts) p. 285, Beijing (China). Sep. 1992



M21983



instituto de pesquisas energéticas e nucleares

Travessa "R", nº 400 - Cidade Universitária - Butantã
São Paulo - CEP.: 05508-900

Tel.: (011) 816-9000 - Fax.: (011) 212-3546

<http://www.ipen.br>

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e associada à Universidade de São Paulo para fins de ensino de Pós-Graduação.