**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**DESENVOLVIMENTO DE IRRADIADOR GAMA DEDICADO AO
BENEFICIAMENTO DE PEDRAS PRECIOSAS**

NELSON MINORU OMI

**Tese como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de Doutor
em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear – Aplicações**

Orientador:

Dr. Paulo Roberto Rela

**São Paulo
2006**

*À minha esposa,
Vera,
por estar sempre
a meu lado.*

Agradecimentos

- ✓ Ao amigo, Dr. Paulo Roberto Rela, pelo incentivo e exemplos que sempre oferece e, nos últimos meses, como orientador dessa Tese;
- ✓ À amiga, Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa, que me orientou no Mestrado e também durante a maior parte desse Doutorado;
- ✓ Aos colegas e amigos do Centro de Tecnologia das Radiações, CTR, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, com os quais sempre pude contar;
- ✓ Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pela oportunidade de realizar esse Doutorado;
- ✓ À Comissão de Pós-Graduação do IPEN;
- ✓ Aos membros da Banca de Doutorado, pela dedicação dada ao trabalho e pelas sugestões de melhorias desse texto;
- ✓ Ao meu finado pai, Katsumi Omi, e à minha mãe, Thereza Omi, por terem me dado oportunidade de chegar até aqui;
- ✓ E a todos aqueles que, por lapso de memória, deixei de incluir nesta relação.

DESENVOLVIMENTO DE IRRADIADOR GAMA DEDICADO AO BENEFICIAMENTO DE PEDRAS PRECIOSAS

Nelson Minoru Omi

RESUMO

O processo de irradiação de gemas com raios gama de forma a melhorar as cores é bem aceito na indústria e comércio de jóias. Essas gemas são processadas em irradiadores industriais que são otimizados para outros fins. Para tal, utilizam principalmente aparatos para irradiação dessas pedras no fundo das suas piscinas de armazenamento das fontes, com um aproveitamento menor que o desejado, principalmente pela variação das taxas de dose encontrada nesses dispositivos. O desenvolvimento de um projeto de concepção, que estabelece os princípios físicos de funcionamento e formas de construção do novo tipo de equipamento, foi realizado nesse trabalho. O dispositivo sugerido baseia-se no princípio de rotação e translação circular de cestos em órbitas externa e interna a um porta-fontes cilíndrico, como um sistema planetário. O dispositivo foi idealizado para expor as gemas à irradiação no fundo da piscina, onde estão as fontes. Assim, essas fontes ficam permanentemente blindadas pela lâmina d'água. O irradiador é classificado como categoria III pela AIEA. Para verificar a viabilidade física do princípio básico, ou seja, o uso de cestos cilíndricos rotativos, foram realizados ensaios no Irradiador Multipropósito do CTR, no IPEN, além de simulações correlacionadas usando o aplicativo CADGAMMA adaptado para simular a irradiação submersa. A construção do irradiador definitivo leva ao aumento da qualidade da irradiação das pedras, com maior controle sobre as doses no produto. O custo operacional é significativamente reduzido pois o dispositivo foi otimizado para o beneficiamento pretendido.

GEMSTONE ENHANCING DEDICATED GAMMA IRRADIATOR DEVELOPMENT

Nelson Minoru Omi

ABSTRACT

The gemstones gamma irradiation process to enhance the color is widely accepted for the jewelry industry. These gems are processed in conventional industrial gamma irradiation plant which are optimized for other purposes, using underwater irradiation devices with high rejection rate due to its poor dose uniformity. A new conception design, which states the working principles and manufacturing ways of the device, was developed in this work. The suggested device's design is based on the rotation of cylindrical baskets and their translation in circular paths inside and outside a cylindrical source rack as a planetary system. The device is meant to perform the irradiation in the bottom of the source storage pool, where the sources remain always shielded by the water layer. The irradiator matches the Category III IAEA classification. To verify the physical viability of the basic principle, tests with rotating cylindrical baskets were performed in the Multipurpose Irradiator raised in the CTR, IPEN. Also, simulations using the CADGAMMA software, adapted to simulate underwater irradiations were performed. With the definitive irradiator, the irradiation quality will be enhanced with better dose control and the production costs will be significantly lower than market prices due to the intended treatment device's optimization.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Contribuições do Trabalho	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Teorias que explicam a formação de cor	6
2.2 Interação da Radiação Gama do Cobalto-60 com as Gemas	8
2.3 Gemas que se beneficiam com a radiação gama	10
2.4 Formação da dose de irradiação no material	11
2.5 Irradiação submersa	12
2.6 Irradiadores Existentes	14
3 ORIGINALIDADE	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1 Metodologia de concepção	17
4.1.1 Definição das diretrizes básicas	17
4.1.2 Irradiador de Categoria III	18
4.1.3 Movimentação do Produto	21
4.1.4 Movimentação de translação dos cestos	23

4.2 Experimentos	25
4.2.1 Descrição do dispositivo de ensaio	25
4.2.2 Resultados esperados	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Análise dos ensaios com o dispositivo básico	35
5.1.1 Dados coletados	35
5.1.2 Discussão dos dados experimentais	39
5.2 Dispositivo de irradiação planetária	40
5.2.1 Base porta-fontes	42
5.2.2 Conjunto principal	45
a - Rotação independente do disco e cestos	46
b - Sistema planetário de engrenagens	47
c - Sistema de acionamento da rotação dos cestos por catraca	49
d - Sub-sistema de subida/descida do dispositivo principal	51
5.2.3 Determinação dos parâmetros gerais	54
a - Calor gerado pelo cobalto	55
b - Profundidade da piscina	56
c - Estimativa das dimensões dos cestos	56
d - Disco principal	62
e – Acionamento do disco principal	62
5.3 Análise de viabilidade econômica	63
6 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Alguns tipos de tratamento catalogados pela AGTA.	2
TABELA 2 - Raios e partículas usadas para a irradiação de gemas (NASSAU, 1984).	3
TABELA 3 - Doze causas da cor.	7
TABELA 4 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras pequenas.	35
TABELA 5- Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras médias.	35
TABELA 6 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras grandes.	36
TABELA 7 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras pequenas.	36
TABELA 8 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras médias.	37
TABELA 9 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras grandes.	37
TABELA 10 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras grandes, com cesto de 210 mm	38
TABELA 11 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras grandes, com cesto de 210 mm	38
TABELA 12 - Dimensões da geometria de distribuição dos cestos, em mm.	60

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 - Etapas da formação de centros de cor: a) Efeito Compton com precursores de lacuna e de captura de elétrons e b) os centros de lacuna e de elétrons.	8
FIGURA 2 - Esquema de disposição dos átomos do a) quartzo puro; e b) quartzo com impureza de alumínio e um íon de hidrogênio para balanço eletrônico, formando o precursor do centro de cor do quartzo fumê	9
FIGURA 3 - Exemplo de irradiador classe III	19
FIGURA 4 - Posicionamento das fontes na piscina (cilíndrica).	20
FIGURA 5 - Curvas isodose estimadas para o produto.	22
FIGURA 6 - Esquema de exposição em espiral com os cestos cilíndricos e as fontes seladas na vertical.	23
FIGURA 7 - Sistema de irradiação horizontal.	24
FIGURA 8 - Movimentação horizontal dos cestos em relação ao <i>rack</i> de fontes.	25
FIGURA 9 - Fontes seladas distribuídas nos magazines do irradiador, com o posicionamento do cesto nos experimentos.	26
FIGURA 10 - Rack de fontes no fundo da piscina do Irradiador Multipropósito	26
FIGURA 11 - Fotos do protótipo de cesto no fundo da piscina do Irradiador Multipropósito do CTR.	27
FIGURA 12 - Esquema do dispositivo simplificado de irradiação.	28

FIGURA 13 - Roda dentada da redução com a parte superior do eixo do cesto.	28
FIGURA 14 - Redução do dispositivo simplificado montada na piscina, com o eixo do cesto e o cesto (não visível) na posição de irradiação.	29
FIGURA 15 - Sistema de alimentação do motor de passos.	29
FIGURA 16 - Posicionamento dos dosímetros no cesto.	30
FIGURA 17 - Identificação dos dosímetros a serem posicionados no protótipo de cesto.	31
FIGURA 18 - Posicionamento dos dosímetros no cesto montado com pedras grandes, em foto tirada antes da irradiação.	31
FIGURA 19 - Posicionamento dos dosímetros no cesto montado com pedras médias, em foto tirada depois da irradiação.	31
FIGURA 20 - Protótipo do cesto fechado, carregado de pedras e sendo pesado na balança do Irradiador Multipropósito.	32
FIGURA 21 - Comparação da distribuição de taxas de doses em plano central do cesto para irradiação com carreira simples de fontes seladas (E) e irradiação com a segunda carreira de fontes (D), tendo o rack de fontes à esquerda.	33
FIGURA 22 - Desenho de projeto de concepção do sistema de movimentação ao redor das fontes.	41
FIGURA 23 - Base porta-fontes com quatro fontes seladas e três de seis colunas representadas.	43
FIGURA 24 - Posicionamento dos furos do anel porta-fontes.	44
FIGURA 25 - Esquema de transmissão independente para o movimento de rotação para os cestos.	46

FIGURA 26 - Esquema para cálculo da velocidade angular do cesto.	47
FIGURA 27 - Esquema da catraca apresentando o giro da roda dentada inverso á translação de seu eixo em torno do eixo fixo do came.	49
FIGURA 28 - Dispositivo planetário com catraca de acionamento do posicionamento angular dos cestos.	50
FIGURA 29 - Sub-sistema de elevação em um irradiador com piscina própria, com proporções não mantidas para a representação do conjunto.	52
FIGURA 30 - Sistema de flanges que prendem o disco principal aos cabos ou correntes do elevador.	53
FIGURA 31 - Esquema da simulação utilizada no levantamento da uniformidade de doses, apresentando a exposição em uma face da placa e o resultado com a irradiação em ambas as faces.	57
FIGURA 32 - Comportamento da uniformidade de dose de uma placa em frente a uma fonte selada de cobalto-60 em relação à distância da fonte selada.	58
FIGURA 33 - Vista superior do disco principal com a conexão entre os eixos dos cestos.	61
FIGURA 34 - Catracas montadas para acionamento dos cestos.	61

1 INTRODUÇÃO

As características naturais de algumas regiões no mundo criaram, com o passar de milênios, pedras de coloração, transparência e efeitos visuais de inestimável beleza. Muitas delas, associadas ao trabalho de lapidadores e de joalheiros, atingem altos valores de mercado e têm sido objeto de desejo de pessoas com alto poder aquisitivo, principalmente para investimento e ostentação.

Segundo Nassau (1978), quatro teorias distintas são necessárias para cobrir completamente os processos nos quais, constituintes intrínsecos, impurezas, defeitos e estruturas específicas resultem no que denominamos como cor.

Essas teorias são:

- ✓ Teoria do campo cristalino;
- ✓ Teoria do orbital molecular;
- ✓ Teoria de banda e
- ✓ Ótica.

Fatores explicados por essas teorias acabam resultando na absorção seletiva de espectros de luz, sendo que a impressão final da cor é aquela para a qual o material não consegue absorver sua energia.

O ser humano utiliza vários métodos para realçar artificialmente a beleza dessas gemas, sendo que associações internacionalmente reconhecidas, como a American Gem Trade Association (AGTA), classifica a maioria dos tratamentos conhecidos e sugere a rotulação das gemas comercializadas por letras, sendo que parte desses tratamentos é apresentada na TAB.1, baseada em sua publicação (AGTA,1997). Os detalhes de como são feitos e quais parâmetros são importantes para esses tratamentos são mantidos em segredo, principalmente por motivos comerciais. Assim, por exemplo, a dissertação apresentada na UNESP (MONTEIRO, 2001) cita a quantidade de radiação utilizada para saturar pedras de determinada origem, mas não define qual seria a dose ideal para que se obtenha essa saturação. Os métodos, as temperaturas utilizadas e a curva de aquecimento ou resfriamento de uma gema para obter os melhores resultados, obtidos por ensaios ou passados por gerações de pai para filho, são segredos muito bem guardados.

TABELA 1 - Alguns tipos de tratamento catalogados pela AGTA

CÓDIGO	TRATAMENTO	DESCRIÇÃO
B	Clareamento (<i>Bleaching</i>)	Uso de produtos químicos ou outros agentes para clarear ou remover a cor das gemas
C	Cobertura (<i>Coating</i>)	Uso de tratamentos superficiais, como laqueamento, esmalte, pintura e folheamento, para melhorar a aparência, dar cor ou acrescentar outros efeitos especiais
D	Tingimento (<i>Dyeing</i>)	A introdução de material para colorir em uma pedra para dar-lhe nova cor, intensificar a atual ou homogeneizar a cor.
G	Irradiação com raios gama ou elétrons (<i>Gamma/Electron Irradiation</i>)	Uso de irradiação gama ou feixe de elétrons para alterar a cor das gemas, pode ser seguida de processo de aquecimento
H	Aquecimento (<i>Heating</i>)	O uso de calor para efetivar a alteração desejada de cor, transparência ou outro fenômeno
I	Preenchimento (<i>Infilling</i>)	Preenchimento intencional de cavidades superficiais ou fraturas, com vidro, plásticos ou outros materiais enrijecedores ou substâncias rígidas e para aumentar a durabilidade, aparência ou adicionar peso.
O	Oleamento/infusão de resina (<i>Oiling/Resin Infusion</i>)	Preenchimento intencional de cavidades superficiais ou fraturas com óleos incolores, ceras ou materiais sintéticos não enrijecidos em gemas transparentes ou translúcidas com fissuras
R	Irradiação (<i>Irradiation</i>)	A irradiação com nêutrons, que requer a liberação de segurança ambiental do órgão competente, combinado com outros tipos de radiação e tratamento térmico para alterar a cor da gema.
U	Difusão (<i>Diffusion</i>)	Uso de produtos químicos sob altas temperaturas para produzir cor ou inclusão de asterismo (reflexão em forma de estrela)

A irradiação com raios gama (G) para a formação dos centros de cor nas gemas que possuam seus precursores é o tratamento abordado neste trabalho.

Poder-se-ia dizer que ao se irradiar uma pedra, multiplica-se a possibilidade de ionizar os centros de cor existentes no retículo cristalino ao deslocar elétrons dos precursores de lacuna, possibilitando a formação de novas combinações de ligação as quais geram ou alteram os centros de cor no cristal. Centros de cor de vários tons podem ser gerados em uma única pedra e, com tratamentos específicos, os centros de cor

menos estáveis são eliminados. Isso torna as alterações de cor em gemas, causadas por milhares de anos de radiação natural, principalmente a proveniente dos elementos radioativos naturais próximos, possível de serem obtidas em poucas horas.

Nassau, em seu livro *Gemstone Enhancement* (NASSAU, 1984), mostra a interação de fótons e partículas, junto com os resultados obtidos. A TAB.2 apresenta este levantamento.

TABELA 2 - Raios e partículas usadas para a irradiação de gemas (NASSAU, 1984)

Tipo de radiação	Energia típica (eV)	Uniformidade de coloração	Necessidade de energia	Radioatividade de induzida	Aquecimento localizado
<i>A. O espectro eletromagnético</i>					
Luz	2 – 3	Variável	Baixa	Não	Não
Ultravioleta, Ondas curtas	5	Variável	baixa	Não	Não
Raios X	10.000	Baixa	Média	Não	Não
Raios Gama	1.000.000	Boa	nenhuma	Não	Não
<i>B. Partículas</i>					
Sem carga: Nêutrons	1.000.000	Boa	Muito alta	Sim	Não
Negativo: elétrons	1.000.000	Baixa	Alta	Não	Muito Alto
Negativo: elétrons	10.000.000	Baixa	Alta	Sim	Muito Alto
Positivo: prótons, dêuterons, etc.	1.000.000	Baixa	Alta	Sim	Algum

A irradiação com nêutrons, apesar de ser aplicada em alguns países com alteração da cor das gemas, não será discutida neste trabalho. O fato de os nêutrons induzirem radioatividade no material irradiado tem direcionado os beneficiadores de pedras para a utilização de radiação com raios gama, feixes de elétrons e raios X.

A radiação ionizante dos raios X e dos feixes de elétrons, com energia limitada para não induzir ativação no material irradiado, também poderia ser utilizada mas devido à baixa eficiência na conversão energética dos equipamentos de raios X e à baixa penetração dos feixes de elétrons, essas aplicações são, atualmente, de pouco interesse comercial.

A irradiação comercial de pedras tem sido realizada em irradiadores construídos e otimizados para outros propósitos. Essa irradiação geralmente ocorre com a fonte no fundo da piscina, inviabilizando o tratamento de outros materiais durante o

beneficiamento das gemas. Devido à grande demanda e ao alto valor a ser agregado à gema irradiada, algumas instalações acabam por dedicar grande parte tempo de operação durante o ano para a execução desse serviço, com a utilização exclusiva do irradiador para essa aplicação. Isso ocorre com distribuição das fontes e geometria de irradiação não apropriada, levando a um baixo rendimento e a uma grande variação de doses nas pedras processadas, com baixo o índice de aproveitamento do produto.

Como neste trabalho será abordada apenas a utilização dos raios gama gerados pelo cobalto-60, o termo irradiação, neste texto, restringir-se-á apenas a este tipo de radiação. Também neste texto, o termo propriedades óticas ou características óticas das gemas engloba a cor, brilho e fenômenos específicos como o asterismo e iridescência.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é voltado para a área de engenharia de aplicação da radiação ionizante em processos industriais. este objetivo é o projeto de concepção de um sistema de irradiação que utiliza o cobalto-60 dedicado ao beneficiamento de gemas, que possam ter suas propriedades óticas melhoradas pela radiação ionizante. A irradiação dessas pedras altera diretamente ou possibilita a alteração das propriedades de absorção da luz em determinados comprimentos de onda, resultando na alteração do seu comportamento no espectro visível, alterando a forma como se apresentam as gemas, realçando ou alterando sua cor ou o modo como espalha a luz incidente.

A verificação da viabilidade técnica do processo, através de ensaios básicos, e da sua viabilidade econômica, com a análise de custos, é parte do processo de concepção do irradiador.

O projeto visa otimizar o processo de irradiação de gemas, com maior controle das taxas de dose e uniformidade da dose total, utilizando-se de fontes seladas de cobalto-60 de várias atividades, com possibilidade de serem montadas em posições aleatórias. Essa característica do irradiador torna-o apto a receber cargas de diversas procedências, restritas apenas a dimensões padrão utilizadas em irradiadores comerciais, ou seja, iguais às do modelo C-188 da MDS Nordion (CALVO, 2004), Canadá, com atividades entre 37 TBq (1 kCi) e mais de 0,444 PBq (12 kCi), sem a necessidade de rearranjo nas posições das fontes à medida em que forem sendo carregadas.

1.2 Contribuições do Trabalho

O projeto de concepção de um irradiador dedicado ao beneficiamento de gemas é uma resposta aos anseios de empresas ligadas ao setor de extração e comercialização de pedras preciosas e semi-preciosas do País.

A irradiação dessas pedras, além de outros tratamentos e da lapidação, faz com que os valores de mercado das pedras e jóias nacionais sejam incrementados. Ao fazê-lo com menor custo geral e maior aproveitamento do produto beneficiado em relação ao método atualmente utilizado para irradiá-las, o irradiador proposto reduz os custos de produção.

O irradiador completo, que inclui a piscina com os sistemas periféricos, sistemas de controle e segurança radiológica destinados à utilização deste dispositivo, poderá ser construído e operar junto às mineradoras ou áreas de beneficiamento e comercialização de forma a evitar a logística de transporte do material para o tratamento. Além disso, o projeto visou facilitar também seu deslocamento para novas zonas de mineração ou de beneficiamento, tendo apenas uma fração do investimento inicial para esse deslocamento.

O custo e a simplicidade de implantação, estimados para este projeto, torna-o atraente aos investidores privados, em relação ao uso de irradiadores convencionais para o tratamento dessas pedras, o que também libera as plantas comerciais existentes para as práticas a que foram projetadas, como esterilização de produtos médicos e irradiação de alimentos.

Como inexiste um projeto parecido no mundo, o irradiador proposto poderá ser implantado também em outros países que irradiem gemas, gerando mais divisas para o nosso País.

Os estudos que envolvem este desenvolvimento geram ainda outros dispositivos para irradiação submersa e de materiais de densidades consideradas altas, adaptáveis aos irradiadores existentes.

Uma contribuição indireta deste trabalho é demonstrar que é possível criar sistemas específicos para irradiação de produtos especiais com produtividade e custos bastante atraentes, a ponto de poderem ser parte integrante da linha de produção dos materiais irradiados, evitando também a necessidade de deslocamento do produto entre a linha de produção e os irradiadores comerciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Teorias que explicam a formação de cor

Segundo Nassau (1978), os formalismos, ou teorias, que envolvem a formação da cor em gemas são basicamente quatro. Elas são:

- ✓ Teoria do campo cristalino;
- ✓ Teoria do orbital molecular;
- ✓ Teoria de banda e
- ✓ Ótica, ou fenômenos óticos.

Essas teorias acabam resultando na absorção seletiva de espectros de luz, sendo que a impressão final da cor é aquela para a qual o material não consegue absorver sua energia.

A teoria do campo cristalino explica a cor, bem como a fluorescência em minerais contendo metais de transição, como o ferro (Fe^{2+} , Fe^{3+}), presente no citrino que também pode ter sua valência alterada pela radiação (Fe^{4+}), passando a exibir a cor púrpura, ou violeta, da ametista. O conceito de armadilhamento, parte da teoria do campo cristalino explica a estabilidade variante com a incidência de luz ou certas temperaturas, assim como a termoluminescência.

A teoria do orbital molecular, baseada em órbitas eletrônicas que não pertencem a um único átomo como na teoria do campo cristalino, mas a múltiplos átomos, explica a cor de minerais com transferência de carga envolvendo metais, como na safira azul, e não metais, como na lazurita, grafite e minerais coloridos organicamente.

A teoria de banda explica as cores em minerais metálicos e materiais semicondutores, com as cores preta, vermelha, amarela, incolor em minerais como a galena e diamante, bem como as cores amarela e azul causadas em por impurezas no diamante.

Os fenômenos óticos são as cores explicadas por efeitos físicos como dispersão, espalhamento, interferência e difração.

A TAB.3, baseado na publicação de Nassau (1978), apresenta doze causas de cor, com alguns minerais que as apresentam e a teoria associada.

TABELA 3 - Doze causas da cor

CAUSA DA COR	ALGUNS MINERAIS	TEORIA
Compostos de metais de transição	Almandina, malaquita, turquesa	Campo cristalino
Metais de transição como impureza	Citrino, esmeralda, rubi	Campo cristalino
Centros de cor	Ametista, fluorita, quartzo “fumê”	Campo cristalino
Transferência de carga	Safira azul, lazurita, crocoita	Orbital molecular
Materiais orgânicos	Âmbar, coral, grafite	Orbital molecular
Condutores	Cobre, ferro, prata	Banda
Semi-condutores	Galena, proustita, pirita, enxofre	Banda
Semi-condutores dopados	Diamante azul, diamante amarelo	Banda
Dispersão	Facetamento em “fogo”	Fenômenos óticos
Espalhamento	Pedra da lua, asterismo na opala, olho de tigre	Fenômenos óticos
Interferência	Calcopirita iridescente	Fenômenos óticos
Difração	Opala	Fenômenos óticos

Na natureza, essas pedras preciosas são formadas por processos geológicos que resultam no crescimento de cristais, com impurezas específicas das áreas onde cresceram e milênios de submissão a processos físicos que geram essas cores. Grande parte dessa coloração pode ser realçada e até mesmo ser revertida por meios físicos como o aquecimento ou exposição à luz, pois estes meios podem fornecer energia suficiente para que haja a regeneração citada.

Muitas vezes, o tratamento pretendido visa esmaecer apenas algumas tonalidades, como quando centros de cor de mais de uma origem são formados. Neste caso, aquecimento controlado tem sido utilizado para que o centro de cor que é estável até temperaturas superiores possa prevalecer. A irradiação com raios gama é um dos métodos utilizados para que centros de cor latentes sejam formados.

2.2 Interação da Radiação Gama do Cobalto-60 com as Gemas

A interação da radiação gama do cobalto-60 com as gemas pode ser restrita ao efeito fotoelétrico, ao efeito Compton e, como radiação secundária, a interação de fótons e de elétrons ejetados pelos efeitos anteriores. Essas interações, ao ejetarem um elétron de uma posição nos átomos do retículo cristalino onde haja um precursor de centro de lacuna, gera condições para que o precursor se torne um centro de lacuna. O elétron ejetado pode ser armadilhado, ou capturado, por um íon, precursor de um centro de armadilhamento, ou captura, de elétrons, formando o centro de elétron. Esses centros interagem de modo diferenciado com as ondas do espectro de luz, podendo absorver fótons de determinado comprimento de onda. Se os fótons absorvidos estiverem no espectro visível, isso altera a cor do material e o centro, de lacuna ou de captura de elétron, passa a ser conhecido como centro de cor.

A FIG.1, baseada nos esquemas apresentados por Nassau (1983) apresenta um esquema simples de ionização como: a) precursores de centros tipo lacuna (A), sendo ionizado por efeito Compton, e tipo captura de elétrons (B); e b) centros de lacuna e de elétrons resultantes.

FIGURA 1 - Etapas da formação de centros de cor: a) Efeito Compton com precursores de lacuna e de captura de elétrons e b) os centros de lacuna e de elétrons.

Por exemplo, o Al^{3+} está presente no quartzo como impureza na composição $[\text{AlO}_4]^{5-}$, no lugar do Si^{4+} do $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Para equilíbrio eletrônico do conjunto, normalmente se encontra próximo um íon de hidrogênio, H^+ , ou de sódio, Na^+ . O $[\text{AlO}_4]^{5-}$ forma um precursor de centro de lacuna (*hole center*), enquanto que o íon de hidrogênio, por exemplo, forma um precursor de armadilhamento ou captura de elétrons (*electron trap*, também conhecido como *electron center precursor*). Com a ionização

provocada pela radiação, há a ejeção de um elétron do precursor de lacuna que pode ser capturado pelo íon de hidrogênio, sendo que tanto o conjunto precursor de lacuna quanto o íon de hidrogênio passam a ter equilíbrio de carga eletrônica, tornando-se estáveis até que alguma outra condição, como o aquecimento a dada temperatura, permita a reversão do processo.

A FIG.2 apresenta o esquema do cristal de quartzo puro e com a impureza de alumínio, este precursor do centro de cor do quartzo esfumado, conhecido comercialmente como quartzo fumê.

FIGURA 2 - Esquema de disposição dos átomos do a) quartzo puro; e b) quartzo com impureza de alumínio e um íon de hidrogênio para balanço eletrônico, formando o precursor do centro de cor do quartzo fumê.

Na prática, tanto a radiação direta dos raios gama emitidos pelo cobalto-60, como a radiação eletromagnética e de elétrons gerada pela interação da radiação com o meio são capazes de ionizar o retículo cristalino.

Resumidamente, a radiação ionizante, ao retirar elétrons das ligações do retículo cristalino, cria condições para que os cristais formem novos arranjos internos.

Essas novas ligações interagem de modo diferente com o espectro da luz visível, alterando a forma como o cristal absorve fótons de determinado comprimento de onda.

Assim como as gemas de origem mineral, as gemas de origem biológica como as pérolas também podem sofrer beneficiamentos pela radiação ionizante.

2.3 Gemas que se beneficiam com a radiação gama

Em princípio, todas as pedras, preciosas ou não, podem ser submetidas à radiação gama oriunda do cobalto-60. Porém, as gemas que são realmente beneficiadas pela radiação gama, no sentido de melhorar seu comportamento ótico, são poucas.

O fato de a radiação do cobalto-60 provocar apenas a ejeção de elétrons nos retículos cristalinos, formando centros de cor apenas se houverem precursores desses centros, restringe os tipos de pedras que podem ter efeitos visualmente perceptíveis de alteração do comportamento ótico, ainda que com doses muito altas. As pedras que não sofrem mudanças com a radiação gama são aquelas que têm a suas propriedades óticas geradas principalmente pela presença de impurezas, com seus centros de cor já formados, e muito estáveis, ou cuja cor não seja gerada por este formalismo. Por exemplo, ametistas com muito pouca impureza de ferro continuarão pálidas, não importando a dose imposta, ou um rubi, que tem sua cor determinada pela simples presença do cromo como impureza, não passará a exibir uma cor vermelha mais intensa com a radiação ionizante.

Alguns exemplos de pedras brasileiras que podem ser beneficiadas pela radiação gama, são (FAVACHO, LICARDO e CASTAÑEDA, 2001):

- ✓ O quartzo que, ao ser irradiado, pode chegar a tonalidades verde amareladas de bom valor comercial, conhecidas comercialmente como *Green Gold*, *Cognac*, *Wiskey* e *Beer* ;
- ✓ O topázio incolor, que adquire tons de vermelho-amarronzado, de azul ou de uma combinação dessas duas cores;
- ✓ A turmalina, que pode adquirir tons de rosa ou amarelos, ou ainda tornar amareladas as turmalinas rosa.

Naturalmente, outras pedras, como o berilo, espodumênio, escapolita, e fluorita, podem adquirir melhorias com a irradiação gama, e algumas melhorias podem, com tratamentos posteriores como o aquecimento controlado, chegar a resultados muito mais vantajosos.

Como exemplo de irradiação de gemas de origem orgânica, as pérolas também podem agregar valor com o uso da radiação gama. Pérolas de água doce, ao serem irradiadas, adquirem tons escuros tendendo ao negro, ou se tornam marrons, com o desenvolvimento de um brilho metálico e uma iridescência multicolorida altamente desejada conhecida como *Orient*. As pérolas de origem marinha, ao serem irradiadas, são escurecidas em tons azuis ou cinzas, adquirindo um efeito cintilante (PEARLDISTRIBUTORS, 2006).

O tingimento e utilização dos raios gama como tratamento recuperam pérolas que, ao serem escurecidas, têm suas manchas reduzidas ou até eliminadas, atingindo valores mais próximos aos de pérolas perfeitas. A aplicação de métodos de tingimento causa apenas mudanças superficiais na cor, não atingindo as camadas profundas do nacre. A irradiação com raios gama, por ser mais penetrante, modifica todo o nacre da pérola. As doses utilizadas de raios gama também não alteram suas propriedades físicas, como ocorre, por exemplo, com o uso de solução de nitrato de prata para escurecê-las, que amolece as suas superfícies. Isso confere um valor mais consistente às pérolas irradiadas.

2.4 Formação da dose de irradiação no material

A irradiação com raios gama, independentemente do radioisótopo que os geraram, tem sua energia absorvida pelo material irradiado vinda basicamente de duas origens.

Uma delas é a interação direta com o fóton emitido. Essa interação ocorre por meio de efeito fotoelétrico ou efeito Compton, com pequena chance de haver a formação de pares de elétrons, pois as energias dos dois fótons emitidos pelo cobalto-60 são 1,17 MeV e 1,33 MeV. A probabilidade de ocorrência da interação direta diminui com a distância e a quantidade de material existente, e que pode interagir com os fótons, entre a fonte e o ponto estudado.

Uma fatia não desprezível de absorção da energia radioativa emitida provém da radiação secundária, proveniente das interações diretas e de outras radiações secundárias geradas no material que esteja dentro do campo de influência da fonte. Na prática, quanto mais material houver entre a fonte e o ponto que absorve a dose, maior será a fração da dose devida às radiações secundárias. A radiação secundária recebida é conhecida como *buildup*. E havendo material ao lado e atrás do ponto, como esse

material também recebe radiação, a radiação secundária gerada também pode atingir o ponto, contribuindo para o *buildup*.

Embora haja vários métodos e vasta literatura abordando formas de se calcular o fator de *buildup*, que é a razão entre a dose total e a dose devida à radiação direta no ponto estudado, a compreensão de como se distribuem as taxas de dose no material estudado depende apenas do comportamento físico de como se comporta a dose de cada uma dessas origens.

Por exemplo, uma irradiação realizada em ambiente submerso altera a proporção entre as doses diretas e as de *buildup*, que são de energia menor, na composição da dose recebida no material. Para se ter uma idéia, tabelas para avaliação do fator de *buildup* como a gerada pela AMERICAN NUCLEAR SOCIETY (1991) indicam que para o cobalto-60, por exemplo, basta um caminho livre médio (MFP) de água, ou cerca de 11 cm, para que a radiação secundária seja responsável por cerca de 50% da dose absorvida no material do ponto estudado, e com cinco MFPs, a fração devida ao *buildup* passa a ser de 90%.

2.5 Irradiação submersa

Embora não haja documentação específica indicando que as gemas devam ser irradiadas sob a água, tem se observado que os resultados da irradiação submersa são muito melhores no que se refere à obtenção dos resultados finais, do que a irradiação a seco, com cobalto-60. Nenhum trabalho publicado foi dedicado para explicar as diferenças entre a irradiação de gemas com exposição em ambiente atmosférico e em ambiente submerso em água.

Um trabalho relacionando à presença de traços de água em cristais e a alteração do efeito da radiação foi publicado no American Mineralogist em 1986 com autoria de Roger D. Aines e George R. Rossmann (AINES and ROSSMANN, 1986). Nele, a presença de traços de água e a radiólise resultante altera o “dano” efetuado pela radiação.

Observa-se, no entanto, que os cristais beneficiados não são higroscópicos, e a presença de traços de água no mineral é devida, principalmente, à sua presença durante o crescimento do cristal. Portanto, essa teoria não explica a razão de se ter melhores resultados ao irradiarmos gemas em ambiente submerso em água.

Outras razões que poderiam explicar essa característica foram consideradas, como o aquecimento maior das pedras na irradiação em ambiente atmosférico ou a uniformidade de doses diferente, mas foram descartadas.

O aquecimento na água não deve ser muito grande, pois a maior taxa de doses que um irradiador pode oferecer é menor que 587 kGy/h, taxa de exposição para um ponto situado a 150 mm de uma fonte pontual hipotética de cobalto-60 com 37 PBq (1.000 kCi), no vácuo. Transformando os valores em potência, para 1 kg de material, teríamos apenas 163 W. Considerando as trocas de calor, por convecção ou até irradiação térmica, a temperatura de equilíbrio nesse caso não justifica a reversão do efeito da radiação. Basta observar que, para as temperaturas necessárias à reversão da formação dos centros de cor mais estáveis, normalmente acima de 150°C, os dosímetros utilizados no controle das doses se fundiriam, além de, em temperaturas muito menores, perderiam totalmente sua função.

Quanto à uniformidade de doses, esta é pior na água principalmente devido ao fato de a densidade aparente, ou densidade média no volume ocupado, das pedras na água ser maior que a obtida no ar.

Uma hipótese a ser considerada é o fato mencionado no item anterior de que na água a composição da dose tem maior peso do *buildup*. Essa hipótese pode ser explicada por dois fatores, a saber:

- a) A radiação espalhada, além de ter energia menor, atinge o ponto irradiado por todos os ângulos, embora não isotropicamente, ao passo que a radiação direta vem da direção da fonte. A ausência da água deve reduzir as chances de interação desejada com os elétrons de precursores presentes no retículo cristalino, pois a incidência direta passa a preponderar na composição da dose e esta tem sentido definido, ou seja, no sentido fonte-ponto irradiado. Como as estruturas cristalinas possuem suas ligações em planos definidos, a pequena variação na direção da radiação direta vinda de fontes não pontuais, embora não colimada, pode antagonizar a criação de centros de cor, pois pode estar alinhada com um plano onde essa interação seja dificultada. Isso não deve ocorrer em um irradiador tipo Gammacell, pois os fótons que atingem o produto partem praticamente de todos os ângulos, reduzindo a possibilidade de se ter resultados inesperados.

- b) Com a maior parte da dose formada por radiação secundária, a energia média da radiação que interage com o material do ponto irradiado passa a ser menor, com parte dessas interações feita com elétrons espalhados, produtos dos efeitos fotoelétrico, Compton e de espalhamentos de elétrons ocorridos principalmente nas proximidades do ponto estudado. Neste caso, a hipótese de que as órbitas dos precursores de centros de lacuna serem mais susceptíveis a estas radiações secundárias, explicaria também a maior eficiência da radiação submersa. Como argumento, assim como os centros de cor só absorvem fótons de determinada energia, a absorção de radiação com energias muito altas pode ser difícil para os precursores de centros de cor.

Essas são hipóteses a serem investigadas.

Embora ainda incógnita, a razão real para que as gemas tenham melhores resultados se forem irradiadas submersas não é parte do tema desta tese, ficando a explicação do motivo real dessa prática como sugestão para estudos futuros.

2.6 Irradiadores Existentes

Os irradiadores comerciais conhecidos, tipo *tote*, *conveyor* e *pallet*, têm sua otimização priorizada para a irradiação de produtos com densidade aparente menor que $0,5 \text{ g/cm}^3$, pois a maior parte dos produtos irradiados possui baixa densidade aparente. Isso se deve à necessidade de se manter a uniformidade de doses dentro de limites estreitos.

Esses irradiadores, também em sua maioria, possuem suportes de fontes seladas de forma plana, ou racks planos, mantendo-as lado a lado na posição vertical, em uma ou mais carreiras horizontais. São poucos os projetos de irradiadores com racks cilíndricos. E praticamente todos os projetos foram direcionados para a irradiação do produto em ambiente atmosférico.

A irradiação de gemas exige altas doses em materiais com densidades aparentes acima de $1,5 \text{ g/cm}^3$ no ar, além de requererem preferencialmente a sua irradiação estando imersos em água. Essa densidade impõe, para uma uniformidade de doses aceitável, a limitação na espessura do volume a ser irradiado.

Para não comprometer o fundo de uma piscina de armazenamento de fontes, a irradiação de pedras no fundo da piscina de irradiadores comerciais tem que ser

simples. Por este motivo, o tratamento tem sido realizado com as pedras colocadas em um cesto na forma de placa que desce até a posição onde as fontes ficam recolhidas no fundo da piscina. Essas placas permanecem imóveis durante todo o processo. Uma eventual alteração da face voltada para as fontes seladas só pode ser realizada retirando o cesto da piscina para desmontagem e inversão no aparato e nova descida até o fundo da piscina. Essa operação multiplica os riscos de queda do cesto ou dos produtos ao fundo da piscina, o que pode justificar a sua não execução.

A aparente complexidade e os custos envolvidos na construção de um irradiador não convencional podem ter sido a razão de não haverem ainda projetos de sistemas de irradiação com cobalto-60 dedicado a tarefas específicas como a irradiação de gemas, aproveitando-se de características específicas do tipo de produto. Irradiadores pequenos como o Gammacell podem ser suficientes para pequenas quantidades mas para aplicações comerciais, com produção de dezenas ou até centenas de quilos diários, são necessários irradiadores com atividade radioativa de vários PBq (centenas de kCi).

Uma das características da concepção do projeto estudado é a exposição do material por meio da rotação durante a irradiação. Embora hajam alguns projetos de irradiadores em que o produto gira em torno de seu eixo, como o da Picowave Technology (PICOWAVE TECHNOLOGY, 1988), a maioria se baseia na translação simples do material em frente à fonte.

O fato de não existir ainda um irradiador projetado especificamente para a irradiação de gemas faz deste trabalho um processo inédito e também inovador ao criar o projeto de concepção mencionado, abrindo a discussão para irradiadores específicos para materiais com características diversas dos normalmente irradiados.

3 ORIGINALIDADE

Não existe um irradiador comercial projetado e dedicado para a irradiação otimizada de pedras. O projeto de um irradiador dedicado ao beneficiamento de gemas, considerando características específicas para este tipo de beneficiamento é original por si só.

A adoção de técnicas de movimentação, com rotação e translação simultânea dos módulos de produto, aqui denominados cestos, é outro ponto a ser considerado na originalidade do projeto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Metodologia de concepção

4.1.1 Definição das diretrizes básicas

A concepção do projeto do irradiador foi realizada com recursos do IPEN, utilizando a experiência no projeto e instalação de irradiadores do grupo de projetistas do Centro de Tecnologia das Radiações (CTR). A montagem do dispositivo completo de exposição para irradiação poderá ser feita no Irradiador Multipropósito do IPEN (CALVO et al., 2004), aproveitando a estrutura de radioproteção já existente e fontes seladas novas de cobalto-60 e também as provenientes de equipamentos de radioterapia, com atividade inferior à recomendada para tal aplicação. Essa meta, no entanto, foi procrastinada para outra oportunidade por restrições de ordem orçamentária e institucional.

Uma instalação completa de irradiação utilizando o cobalto-60 como fonte de raios gama inclui os sistemas de contenção das fontes, sistemas de radioproteção, como blindagens, detectores e dispositivos de segurança contra exposição acidental, sistemas auxiliares como deionizador e resfriador da água da piscina de contenção, sistemas de proteção física, sistemas de transporte de produto para dentro da zona de exposição e de movimentação do material durante a irradiação, locais próprios para armazenamento do material processado e não processado, edificação nova ou reforma de um prédio no qual tudo será instalado.

Uma vez que a irradiação submersa é determinante para o sucesso da irradiação de gemas e também por simplificar muito a sua construção e as exigências relativas à proteção radiológica, a implantação de um novo irradiador deverá seguir o esquema de um irradiador Categoria III, segundo classificação da AIEA.

O objeto deste estudo se resume ao sistema de transporte das gemas para a zona de exposição e sua movimentação durante a irradiação. Com essa base, podem ser

utilizadas piscinas de irradiadores industriais já instalados, bem como construir uma piscina específica para a utilização do dispositivo desenvolvido.

O projeto de concepção do irradiador de gemas, incluiu a definição de:

- ✓ Um suporte para fontes seladas de cobalto-60, usualmente denominados como lápis, modelo C-188 da MDS Nordion, Canadá, ou equivalente, que as mantenha fixas no fundo de uma piscina;
- ✓ Um sistema elevador para posicionar e retirar o produto da zona de exposição, no fundo da piscina;
- ✓ Um dispositivo de posicionamento dinâmico do material a ser irradiado, em relação à posição das fontes;
- ✓ A profundidade mínima da piscina de armazenamento das fontes de cobalto, com uma capacidade máxima de 37 PBq ou 1.000 kCi.

Dessas definições, o dispositivo de posicionamento dinâmico, terceiro item acima, serve de base para a definição dos dois primeiros. A profundidade mínima da piscina independe dessas outras definições.

Outros parâmetros a serem considerados são: a simplicidade mecânica da movimentação do material, facilitando a manutenção e reduzindo a possibilidade de falha funcional, e a operação segura de carga e descarga de produtos no irradiador.

4.1.2 Irradiador de Categoria III

Do ponto de vista de segurança radiológica, o irradiador a ser projetado será de categoria III, segundo classificação da IAEA, ou seja, “Um irradiador no qual a fonte selada está contida em uma piscina de estocagem cheia de água e o acesso humano à fonte selada e ao volume sob irradiação é restrito fisicamente na configuração do projeto e no seu modo de uso apropriado” (IAEA Safety Series No. 107, 1992), deverá ser intrinsecamente seguro. Segundo a classificação da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, este irradiador será classificado como do grupo I, “Instalações que utilizam fontes seladas de grande porte em processos industriais induzidos por radiação” (CNEN-NE 6.02, 1998)

Existe um irradiador dessa categoria projetado e implementado pela empresa GRAYSTAR, com o nome comercial GENESIS (GRAYSTAR INC, 2006) cujo esquema é representado na FIG.3.

FIGURA 3 - Exemplo de irradiador classe III

Como se pode ver, neste tipo de irradiador não há a necessidade de exposição das fontes fora da sua blindagem, ou seja, da piscina. O material é imerso na piscina e submetido à radiação no fundo, onde estão fixadas as fontes.

Assim, evita-se a necessidade de blindagem extra na superfície e a área do irradiador fica permanentemente livre de exposição à radiação da fonte.

Com isso, a carga e descarga dos materiais a serem irradiados podem ser feitas na área junto à piscina, e a área total necessária à planta como um todo se restringiria a alguns metros quadrados além da área da piscina. O irradiador pode ser montado no “chão da fábrica”, ou do armazém, requerendo apenas barreiras físicas, como cercas ou divisórias para controlar o acesso de pessoal e evitar, entre outras coisas, a contaminação da água da piscina.

A movimentação da carga no preparo para irradiação e a sua retirada deverá ser manual. O preparo incluirá a lavagem prévia das pedras, também para facilitar a manutenção da qualidade da água da piscina.

A FIG.4 apresenta a concepção simplificada da instalação da piscina e as fontes dentro dela.

FIGURA 4 - Posicionamento das fontes na piscina (cilíndrica).

Como demonstra a FIG.4, o material é enviado à posição de exposição no fundo da piscina, onde as fontes permanecem fixas. A exposição só se dará no fundo da piscina, sendo que os trabalhadores estarão permanentemente protegidos pela lâmina d'água e pelo solo ao redor da piscina. O irradiador, portanto, poderá ser classificado como de classe III segundo classificação da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA,1992).

Nota-se que, se conveniente, vários dispositivos de irradiação podem ser montados em uma única piscina, reduzindo os custos relativos de implantação e operação.

O formato sugerido de poço, com paredes se elevando acima do piso, pode ser aproveitado para a instalação de uma tampa bipartida que ficaria fechada tanto com o dispositivo na posição de irradiação como acima da piscina, na posição de carga e descarga de produto, abrindo apenas para inspeções e para a passagem do sistema

planetário, ou dispositivo principal. Isso evitaria eventuais quedas ou invasões na piscina, bem como reduziria significativamente a deposição de detritos na água.

A construção da piscina de formato cilíndrico é um processo simples, incluindo escavação e assentamento de um *liner* de aço inoxidável.

Os próximos itens explicam como se chegou a essa configuração e detalha os aspectos relevantes do dispositivo principal.

4.1.3 Movimentação do Produto

Devido à densidade das pedras, a maioria com densidade real em torno de $2,5 \text{ g/cm}^3$, tendo a densidade aparente no ar próxima de $1,6 \text{ g/cm}^3$ e na água em torno de $1,8 \text{ g/cm}^3$, o gradiente de doses presente neste tipo de irradiação é relativamente grande.

Nos sistemas adaptados que utilizam as fontes normais de irradiadores industriais, a diferença entre as atividades de fontes seladas vizinhas e as posições de fontes seladas sem atividade radioativa, ou *dummies*, também podem gerar gradientes locais. Além disso, para manter uma variação aceitável nas doses do lote irradiado, é necessário limitar a espessura do cesto retangular usado atualmente nos irradiadores instalados.

O estudo do comportamento das doses no produto foi direcionado para a redução do descarte de pedras tratadas ao fornecer regiões, no volume do produto irradiado, onde a dose pode ser mantida dentro de limites mais estreitos e bem delineados.

Para obter o controle acima, optou-se pelo uso de cestos cilíndricos rotativos, que geram doses uniformes em anéis centrados no eixo de rotação. Além disso, pelo formato cilíndrico, os valores das doses decrescem um pouco menos na direção, em relação ao gradiente de penetração perpendicular em um bloco de superfície plana.

A rotação dos cilindros pode ser realizada no fundo da piscina de maneira simples, ao passo que inverter a face de um cesto retangular exigiria mecanismo mais complexo, ou a retirada do cesto da piscina para a movimentação. Para assegurar que haja distribuição de doses o mais uniforme possível, foi adotada a utilização de cestos cilíndricos girando sobre seu eixo principal, mantendo-se o eixo paralelo ao das fontes seladas.

O efeito da rotação dos cestos gera dose nos produtos nele contidos com gradiente exclusivamente radial num plano ortogonal ao eixo de rotação, para materiais com densidade constante.

A variação axial das doses depende da distribuição das pastilhas de cobalto na fonte selada e o posicionamento dos cestos em relação a essa fonte. Na prática, as fontes seladas obedecem a um padrão, como o tipo C188 da Nordion, Canadá, o que deixa a altura dos cesto como variável a ser otimizada.

Uma estimativa qualitativa feita com a utilização do software Cadgamma (OMI, 2000) é representada na FIG.4. Nela são representadas as curvas isodose para uma exposição tipo *source-overlap*, ou seja, com parte da fonte irradiando as faces superior e inferior do produto, por possuir dimensão maior que a do material sendo irradiado. O comportamento apresentado da distribuição doses é obtido com o cesto girando em frente a uma carreira de fontes seladas, verticalmente centradas em relação ao cesto.

FIGURA 5 - Curvas isodose estimadas para o produto.

Na FIG.5, a parte amarelo clara (ao centro acima e abaixo) é a região de menor dose e a azul marinho, no nível central à direita e esquerda, a de maior dose. Cada cor representa uma variação de aproximadamente um quarto da dose mínima.

4.1.4 Movimentação de translação dos cestos

A exposição dos cestos a um ou vários porta-fontes compostos de muitas fontes seladas inclui a movimentação dos cestos para que passem ao lado de todas elas. A translação destes cestos pode ser realizada de muitas formas, com vantagens e desvantagens entre elas.

Foram cogitadas várias técnicas de translação, ou geometrias de translação, considerando a contenção cilíndrica do material a ser irradiado, com rotação sobre o eixo.

Dentre elas, a exposição em forma espiral, com vista de topo apresentada na FIG.6.

FIGURA 6 - Esquema de exposição em espiral com os cestos cilíndricos e as fontes seladas na vertical.

O esquema para irradiação, sugerido na FIG. 6, tem a alimentação de cestos feita pelo centro, sendo que os cestos ficam girando em seus eixos enquanto transladam em espiral para a saída do porta fontes, também em forma espiral.

O esquema da FIG.6 apresenta como vantagem o envolvimento das fontes centrais por várias camadas, ou voltas, de produto, aproveitando melhor a radiação gerada. Essa vantagem fica reduzida pela alta densidade do material a ser irradiado e pelo fato de a irradiação ser em ambiente submerso.

O sistema tem a vantagem de poder ser operado continuamente, mas a necessidade de engate de cada cesto ao sistema e engrenagens do porta fontes, destinado

à movimentação de rotação e translação dos cestos torna o mecanismo muito complexo. Por isso foi descartado.

Um outro esquema, com montagem horizontal das fontes seladas, é apresentado na FIG.7, também prevendo alimentação e retirada contínua.

FIGURA 7 - Sistema de irradiação horizontal.

O sistema representado na FIG.7 tem a rotação determinada pelas cremalheiras, ou engrenagens retas dos suportes horizontais transparentes nos desenhos, e pinhões nos eixos dos cestos. A distância entre os cestos seria mantida por discos livres nas suas extremidades. Este sistema também foi descartado pela necessidade de engate dentro da água. Além disso, a rotação no eixo horizontal dos cestos poderia danificar as gemas, devido à ação da gravidade.

Considerando a simplicidade construtiva, o que leva a robustez, durabilidade geral e facilidade de manutenção, além aspectos como proteção contra contato de partes móveis com as fontes seladas, optou-se pela utilização de um sistema planetário girando ao redor de um rack cilíndrico com uma carreira de fontes seladas. Como a atividade das fontes seladas pode ser pequena, um número elevado dessas fontes é requerido para se obter uma atividade total razoável. Por isso, adotou-se um rack com diâmetro otimizado para conter mais de cem fontes, o que sugeriu a utilização de cestos girando também internamente ao rack, além dos externos.

A movimentação horizontal adotada está indicada na FIG.8.

FIGURA 8 - Movimentação horizontal dos cestos em relação ao *rack* de fontes.

Como na FIG.8, os cestos giram a uma velocidade de rotação $w1$ e de translação $w2$. Com esse movimento, todos os cestos receberão influências iguais de todas as fontes seladas.

O sincronismo entre a rotação e a translação determina o modo como os cestos passarão em frente às fontes seladas a cada volta.

4.2 Experimentos

4.2.1 Descrição do dispositivo de ensaio

Para o estudo de comportamento das doses nos cestos girantes, um protótipo simplificado foi idealizado para ser testado no fundo da piscina do irradiador compacto multipropósito do IPEN.

As diferenças em relação a um sistema como o idealizado para o protótipo são minimizadas pelo fato de o irradiador estar carregado com apenas 13 fontes seladas, distribuídas em seis magazines, de forma que uma das fontes seladas se encontra parcialmente isolada no magazine da posição três, na frente da qual o cesto do dispositivo foi posicionado para irradiação. A FIG.9 apresenta a disposição das fontes nos racks e o posicionamento do cesto. Na montagem do dispositivo, o cesto fica do outro lado do rack.

FIGURA 9 - Fontes seladas distribuídas nos magazines do irradiador, com o posicionamento do cesto nos experimentos.

A FIG.10 apresenta o rack de fontes no fundo da piscina do Irradiador Multipropósito com as treze fontes seladas carregadas até essa data (agosto de 2006) exibindo o efeito Cerenkov em volta de cada fonte.

FIGURA 10 - Rack de fontes no fundo da piscina do Irradiador Multipropósito

A FIG.11 apresenta a foto do protótipo de cesto de 190 mm de diâmetro sendo montado no fundo da piscina do irradiador multipropósito, ao lado do rack de fontes. Nela, o cesto está na sua posição de irradiação do magazine da posição três no rack, com foto tirada do lado oposto da piscina em relação à foto da FIG.10.

FIGURA 11 - Fotos do protótipo de cesto no fundo da piscina do Irradiador Multipropósito do CTR.

O dispositivo simplificado tem um único cesto girante, sustentado por um eixo longo que, por sua vez, é fixo a uma redução por corrente, montada com peças de motocicleta, o que barateia e agiliza sua construção. Essa redução tem estrutura que encaixa na estrutura já existente no irradiador de modo que a repetição do posicionamento do cesto nos ensaios fosse facilmente repetido. O acionamento do conjunto é feito por um motor de passos, pois a velocidade de rotação era ainda muito baixa para que um motor normal pudesse ser utilizado e isso exigiria uma nova redução.

A FIG.12 apresenta o esquema do dispositivo simplificado de irradiação, este dispositivo poderia ser montado em qualquer irradiador industrial para ensaios ou até mesmo para irradiar pedras.

FIGURA 12 - Esquema do dispositivo simplificado de irradiação.

As FIG.13 apresenta detalhes da redução do dispositivo antes de sua montagem na piscina e a FIG.14 apresenta a redução na sua posição sobre a piscina.

FIGURA 13 - Roda dentada da redução com a parte superior do eixo do cesto

FIGURA 14 - Redução do dispositivo simplificado montada na piscina, com o eixo do cesto e o cesto (não visível) na posição de irradiação.

As fotografias nas FIG.11 e FIG.14 foram realizadas com o material do cesto sendo irradiado. Nessa condição, a taxa de exposição à radiação fora das piscina é desprezível, demonstrando que, numa eventual operação do dispositivo completo, a exposição de pessoas ao lado da piscina não seria um fator de preocupação radiológica.

A FIG.15 apresenta a fonte de tensão e o controlador do motor de passo utilizado no ensaio. Pelo fato de a rotação ser muito baixa e a redução pequena, com a curva de torque nos motores de passo não exibe uma resposta satisfatória em rotações muito baixas foi exigida uma corrente acima do esperado na operação.

FIGURA 15 - Sistema de alimentação do motor de passos.

O cesto ficou a 20 ± 1 cm de distância do centro da fonte selada. Essa distância foi obtida pela medida da distância aos pontos de referência na estrutura fora

da piscina, pois a medição direta foi descartada. O posicionamento vertical foi estimado por método similar.

Com este arranjo, foram realizados ensaios de mapeamento dosimétrico, utilizando dosímetros de polimetil-metacrilato (PMMA), tipo Amber da Harwell. Os dosímetros possuem boa resposta no intervalo de 1 kGy a 30 kGy, com comprimento de onda específico de leitura no espectrofotômetro para dois intervalos de doses, ou seja, 603 nm para doses de 1 kGy a 10 kGy e 651 nm para doses de 10 kGy a 30 kGy. Eles foram lidos conforme a norma ISO/ASTM 51276:2002 e seguindo também outras normas para selecionar e calibrar (ASTM Standard E1261, 1994) e estimar as incertezas do processo (ASTM Standard E1707, 1995).

Devido à particularidade de curvas de isodose circulares e concêntricas, centradas no eixo de rotação do cesto, para cada experimento foram utilizados apenas 16 unidades, distribuídos em quatro planos verticais (**A**, **B**, **C** e **D**) e quatro distâncias radiais (**1**, **2**, **3** e **4**), conforme o esquema da FIG.16. Assim, o anel superior externo teria a dose indicada pelo dosímetro **A4** enquanto que o anel inferior junto ao eixo teria a dose indicada pelo dosímetro **D1**.

FIGURA 16 - Posicionamento dos dosímetros no cesto.

Os dosímetros tiveram seus invólucros identificados com tinta indelével na água, conforme é apresentado na FIG. 17 e o posicionamento deles foi feito conforme as FIG.18 e FIG.19, sendo a primeira tirada antes da irradiação e a segunda depois do processo. A FIG.20 apresenta o protótipo do cesto fechado.

FIGURA 17 - Identificação dos dosímetros a serem posicionados no protótipo de cesto.

FIGURA 18 - Posicionamento dos dosímetros no cesto montado com pedras grandes, em foto tirada antes da irradiação.

FIGURA 19 - Posicionamento dos dosímetros no cesto montado com pedras médias, em foto tirada depois da irradiação.

FIGURA 20 - Protótipo do cesto fechado, carregado de pedras e sendo pesado na balança do Irradiador Multipropósito.

Foram utilizadas pedras comuns, com densidades próximas ao da maioria das pedras contendo gemas, e três tamanhos significativamente diferentes entre si. Com isso, estudou-se também a influência do tamanho das pedras no resultado final da uniformidade de doses.

Para as pedras pequenas, a massa média era de $9,3 \pm 0,1$ g e o volume médio de $3,5 \pm 0,1$ cm³. As pedras médias pesaram $11,1 \pm 0,1$ g, medindo $4,1 \pm 0,1$ cm³, e para as grandes, esses valores foram $21,1 \pm 0,2$ g e $7,8 \pm 0,2$ cm³.

Uma vez que a geometria das pedras brutas é muito semelhante, em média, o tamanho delas variou muito pouco a sua densidade aparente, que ficou em torno de $1,6 \pm 0,2$ g/cm³ no ar e $1,8 \pm 0,2$ g/cm³ na água.

Embora não haja variação sensível da densidade aparente, o estudo da variação da distribuição das doses com o tamanho das pedras a serem irradiadas se faz necessário para o estabelecimento da prática de irradiação. Para isso, foram feitos ensaios com as pedras de três tamanhos diferentes.

De forma a checar também o comportamento do cesto de 210 mm, foram repetidos os ensaios realizados com o dispositivo simplificado e pedras grandes. Para a realização deste ensaio, o eixo do cesto não foi afastado da fonte de modo a manter a distância da superfície do cesto para o eixo dos lápis. Assim a distância para o centro do *rack* de fontes foi reduzida em 10 mm, passando a ter o valor de 19 ± 1 cm.

4.2.2 Resultados Esperados

Por se tratarem de ensaios com montagem manual, as medições dos tempos de irradiação não são muito precisas, com variação estimada de até 5%. Por isso, a análise dos resultados considera apenas a razão entre as doses em um ponto em relação a um ponto de referência. Para estimativa da produtividade, no entanto, as taxas de dose mínima obtidas foram consideradas razoáveis. O ponto de referência selecionado foi o do ponto de menor dose, ou seja, o do dosímetro colocado junto ao eixo do cesto na parte superior.

Fisicamente, esse é o ponto que recebe a menor dose por estar mais distante das fontes da carreira inferior e, desconsiderando essa carreira de fontes, é um dos que recebe a menor dose das fontes em frente a ele.

Pela presença das fontes na carreira inferior, espera-se que haja um acréscimo, embora pequeno pelo fato das fontes ficarem mais distantes e a irradiação ser realizada tendo a água como meio entre as fontes e o material irradiado. O acréscimo é maior próximo à superfície externa que no eixo, devido à menor distância das fontes ao material presente entre a fonte e o eixo (água e pedras). A FIG.21 apresenta como seria a distribuição das doses com e sem a carreira inferior de fontes. Essa figura apresenta como se distribuem as taxas de dose para um dado instante, no cesto, em corte simétrico. Isso equivale ao cesto parado.

FIGURA 21 - Comparação da distribuição de taxas de doses em plano central do cesto parado para a) irradiação com carreira simples de fontes seladas e b) irradiação com a segunda carreira de fontes, ambos com as fontes à esquerda.

A figura foi baseada em dados gerados pelo Cadgamma, adaptado para simular sistemas submersos em água. Apesar de o Cadgamma permitir cálculos para

caixas retangulares, a representação se aproxima da realidade como simulação qualitativa.

Na FIG.21, as paredes do cesto estão representadas pelas linhas pretas, e o eixo central em branco. As linhas coloridas representam faixas de isodose. A presença da segunda carreira de fontes elimina a simetria vertical da irradiação. Devido à carreira inferior, o ponto de máximo deixa de ser central, ficando abaixo da linha de simetria do cesto.

A totalização das doses, considerando a rotação do cesto, gera um perfil semelhante ao da FIG.5 para a irradiação com uma única carreira de fontes seladas.

A fonte do magazine 3 contribui com cerca de 60% da dose no cesto. A presença das outras fontes no fundo da piscina influi parcialmente no resultado da seguinte maneira:

- ✓ As fontes seladas dos magazines 5 e 7 atuam como se fossem parte de um dispositivo como o do projeto, irradiando em distâncias maiores;
- ✓ As fontes seladas dos magazines 4, 6 e 8 atuam acrescentando as doses na parte inferior do cesto, sendo que as fontes seladas dos magazines 6 e 8, ao irradiarem de longe e por baixo, influem com menos de 5% nas doses acima do centro do cesto.

Essas influências são pequenas, em relação às taxas de dose oriundas do magazine 3, pois além da distância geométrica, irradiação é feita sob a água, que atenua grande parte da radiação vinda desses outros magazines.

Verificando que as densidades aparentes das pedras grandes, médias e pequenas não são significativamente diferentes, não se espera um comportamento diferente no mapeamento das taxas de dose.

Com a simulação realizada com o aplicativo CADGAMMA para os dois cestos, o aumento esperado no fator de uniformidade de doses dos ensaios com o cesto de 210 mm em relação ao valor obtido com o cesto de 190 mm é de 10,5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos ensaios com o dispositivo básico

5.1.1 Dados coletados

Para facilitar o estudo do comportamento da distribuição de doses, foi adotado um padrão de análises que elimina o tempo de irradiação como parâmetro. Isso simplificou os ensaios, sem ter que forçar um tempo fixo de irradiação. Com isso, mais ensaios foram possíveis na programação geral de utilização do irradiador.

A TAB.4, a TAB.5 e a TAB.6 listam os resultados normalizados para a obtenção de 1,0 kGy no ponto de mínima dose, com pedras pequenas, médias e grandes, conforme indicado no item 4.2.1. A incerteza das leituras realizadas com esses dosímetros é $\pm 2,5\%$.

TABELA 4 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras pequenas.

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,04	1,09	1,48
B	1,32	1,38	1,69	1,97
C	1,43	1,50	1,75	2,17
D	1,14	1,15	1,29	1,84

TABELA 5 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras médias.

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,01	1,14	1,50
B	1,17	1,32	1,51	1,79
C	1,41	1,47	1,62	1,97
D	1,12	1,13	1,25	1,64

TABELA 6 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras grandes.

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,12	1,18	1,44
B	1,25	1,43	1,64	1,88
C	1,27	1,55	1,62	1,92
D	1,10	1,06	1,22	1,54

Na TAB.4, TAB.5 e TAB.6, podemos verificar a influência das fontes seladas dos magazines da carreira inferior (magazines 4, 6 e 8, da FIG.9), tornando a irradiação verticalmente assimétrica em relação ao centro do material. Considerando que o irradiador projetado tenha apenas uma carreira de fontes seladas no rack de fontes, o resultado real deve ter uniformidade de doses melhor que a verificada no ensaio.

Uma aproximação para os resultados simétricos é a adoção das doses nos níveis superiores, menos afetados pela presença da segunda carreira como estimativa para as doses na metade inferior do cilindro. Assim, teríamos a irradiação simétrica conforme a TAB.7, a TAB.8 e a TAB.9.

TABELA 7 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras pequenas.

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,04	1,09	1,48
B	1,32	1,38	1,69	1,97
C	1,32	1,38	1,69	1,97
D	1,00	1,04	1,09	1,48

TABELA 8 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras médias

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,01	1,14	1,50
B	1,17	1,32	1,51	1,79
C	1,17	1,32	1,51	1,79
D	1,00	1,01	1,14	1,50

TABELA 9 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras grandes

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,12	1,18	1,44
B	1,25	1,43	1,64	1,88
C	1,25	1,43	1,64	1,88
D	1,00	1,12	1,18	1,44

Fisicamente, o material do plano 3 recebe mais influência das fontes seladas da carreira inferior que o do plano 4. Deste fato podemos concluir que a uniformidade de doses é ainda melhor, ou seja, o fator de uniformidade de doses a ser obtida é menor ainda. Tomando números conservadores, pode-se dizer que a uniformidade de doses obtida é $1,9 \pm 0,1$.

Como houve pouco tempo entre os ensaios realizados com o cesto com o diâmetro de 190 mm, a redução na atividade da fonte foi desprezada nos cálculos da taxa de dose mínima. Incluindo a incerteza dos tempos de irradiação, a taxa de dose mínima ficou em $0,83 \pm 0,6$ kGy/h, considerando unicamente a influência das fontes seladas das fontes seladas alinhadas horizontalmente com o cesto no fundo da piscina, com uma atividade de 1,47 PBq.

A TAB.10 apresenta os resultados para irradiação com cestos com 210 mm de diâmetro e pedras de tamanho grande e a TAB.11 apresenta os resultados corrigidos para irradiação simétrica, conforme foi realizado para os cestos de 190 mm. Os ensaios não foram repetidos para os outros tamanhos de pedras, pois os resultados obtidos com o diâmetro de cestos de 190 mm demonstraram que não havia variação sensível no

comportamento devido à variação no tamanho das pedras, como era esperado devido à não variação da densidade aparente das pedras.

TABELA 10 - Resultados dos ensaios dosimétricos realizados com pedras grandes, com cesto de 210 mm

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,00	1,25	1,75
B	1,24	1,33	1,68	2,08
C	1,30	1,40	1,81	2,11
D	1,06	1,17	1,23	1,78

TABELA 11 - Resultados corrigidos para os planos inferiores com pedras grandes, com cesto de 210 mm

Plano	Dose relativa à dose do ponto A1 ($\pm 5\%$)			
	1	2	3	4
A	1,00	1,00	1,25	1,75
B	1,24	1,33	1,68	2,08
C	1,24	1,33	1,68	2,08
D	1,00	1,00	1,25	1,75

Na TAB. 10, o fator de uniformidade de doses obtida é igual a 2,11. Com os valores das doses relativas apresentadas na TAB.11, o fator de uniformidade de doses obtido é 2,08. Considerando os desvios estatísticos, podemos dizer que o valor é $2,1 \pm 0,1$.

Comparando os valores dos fatores de uniformidade de doses obtidos para os ensaios com cestos de diâmetro 190 mm e os com o cesto de 210 mm, conclui-se que a uniformidade de dose com o segundo cesto, nas condições descritas no item 4.2.1, aumenta em 10,5% em relação aos ensaios com o cesto de menor diâmetro. O resultado está de acordo com o valor esperado, obtido nas simulações.

5.1.2 Discussão dos dados experimentais

Comparando as uniformidades de dose com as possíveis de se obter com um irradiador de fonte plana e a irradiação em caixas estreitas, ou placas, como as utilizadas nos irradiadores comerciais, o fator de uniformidade de doses obtido com o uso dos cestos é superior.

Utilizando o software para cálculos de doses Microshield (NEGIN,1986), com uma fonte ideal, plana e com atividade uniformemente distribuída, tendo dimensões normais de uma carreira de fontes e material irradiado com densidade aparente de $1,8 \text{ g/cm}^3$, espessura equivalente à metade do diâmetro do cesto, obtém-se um fator de uniformidade de doses acima de 7,0, se irradiado de apenas de um lado, e acima de 2,5 se irradiado por ambos os lados.

A melhor homogeneidade de doses obtida nos ensaios se deve ao fato de que cada ponto externo do cesto girante passa por taxas de dose variando entre o máximo, quando próximo da fonte selada e o mínimo, quando na posição diametralmente oposta, ao passo que os pontos centrais têm sua taxa de dose praticamente imutável durante o processo.

Quanto à necessidade de se calcular a capacidade de irradiação do dispositivo de irradiação planetária, estudou-se as taxas de dose mínima resultante dos ensaios, resultando em $0,83 \pm 0,6 \text{ kGy/h}$, para uma fonte de 39,8 kCi (incluindo apenas as fontes seladas do nível superior). Com isso, se tivermos uma fonte, por exemplo, de 200 kCi, irradiando a 200 mm de distância do rack, teríamos as taxas de doses cerca de cinco vezes maiores.

O dispositivo de irradiação planetária manterá os cestos a uma distância menor, 60 mm. Como a fonte não é simples e pontual e a irradiação é feita em ambiente submerso em água, as taxas de dose nos pontos estudados não obedecem simplesmente ao inverso do quadrado da distância. Uma estimativa realizada pelo Cadgamma demonstra que a 60 mm de distância, o fator de uniformidade de doses aumenta em 8,8% e a dose mínima, aproximadamente, triplica.

Fazendo a irradiação com 7,4 PBq (200 kCi) de atividade e a 60 mm de distância do rack, teríamos, a grosso modo, a taxa de dose mínima aumentada em pelo menos quinze vezes ou $12,45 \text{ kGy/h}$.

Com isso, para obter 600 kGy de dose mínima no sistema proposto com a atividade acima mencionada, seriam necessárias cerca de 48 horas de irradiação. Acrescentando o tempo de montagem/desmontagem dos 20 cestos, teremos mais 10 a 15 minutos por carregamento, para uma operação segura.

Um carregamento total de 15 cestos com 16 kg de pedras cada e 5 cestos com 19,5 kg, soma 337,5 kg.

Adotando o tempo de irradiação médio de 50 horas por carregamento, conclui-se que são necessários 0,148 horas por kg de pedras irradiadas, ou cerca de 9 minutos para cada kg.

Mantendo-se as 50 horas para obter 600 kGy no produto e tendo 8000 horas de utilização anual, seriam possíveis 160 carregamentos anuais, ou o processamento de 54.000 kg de pedras por ano, processadas com a dose mínima citada.

Os ensaios demonstram a capacidade produtiva e o controle de doses que se pode ter sobre o produto.

5.2 Dispositivo de irradiação planetária

O dispositivo de irradiação planetária, ou dispositivo principal concebido no presente trabalho, que poderá ser um acessório removível do irradiador do CTR, tem como princípio básico de funcionamento a movimentação em rotação e translação do produto ao redor das fontes, que são fixas em um suporte cilíndrico no fundo da piscina. O conjunto está representado na FIG.22. A construção de um irradiador próprio inclui também um sistema de depuração mais robusto da água da piscina, pois o material a ser irradiado pode se tornar fonte de impurezas minerais para a água.

O dispositivo concebido tem as seguintes características:

- ✓ Ser adaptável a piscinas dos irradiadores existentes além de ser montado em piscina própria;
- ✓ Estabelecer a geometria e a dinâmica da irradiação de forma a otimizar a homogeneização das doses durante a irradiação;
- ✓ Utilizar formas geométricas adequadas, de forma a minimizar a dose recebida na estrutura do sistema;
- ✓ Utilizar materiais com alta resistência à corrosão e estruturalmente imunes à radiação presente no processo;

✓ Possibilitar a operação segura do ponto de vista de radioproteção e também do ponto de vista ergométrico.

Uma vez que a finalidade do projeto é sua aplicação industrial, foi dada ênfase na relação custo/benefício de sua implantação em processos comerciais.

A FIG.22 apresenta o desenho de conjunto da concepção do dispositivo de movimentação planetária. Ele está representado no fundo da piscina. O sistema contempla todas as diretivas adrede.

Ele se divide em duas partes, sendo uma parte móvel, que é o sistema de movimentação e os cestos, e uma fixa, consistindo na base porta-fontes, ou *rack*, o suporte do eixo principal e as fontes propriamente ditas. Essa parte é fixa no fundo da piscina por meio de grampos aparafusados, o que facilita sua montagem em piscinas já construídas.

FIGURA 22 - Desenho de projeto de concepção do sistema de movimentação ao redor das fontes.

No dispositivo da FIG.22, os eixos dos cestos devem ser ligados por uma corrente, não representada, que mantém todos os cestos girando sincronizados. O sistema é acionado pela rotação do eixo principal, que também é usado como guia para a descida/subida do conjunto móvel. Nele, uma engrenagem central se fixa no topo do

suporte do eixo principal e, ao anular sua velocidade angular, aciona a rotação dos cestos, em velocidade angular superior à do disco principal. A movimentação horizontal resultante é apresentada na FIG.8.

O sistema todo ocupa uma área circular de 1,24 m de diâmetro no fundo da piscina, simplificando a construção dessa peça. Por outro lado, podem ser montados vários dispositivos independentes em uma piscina maior, reduzindo os custos relativos de construção do irradiador, com o compartilhamento do recinto do irradiador, dos sistemas de resfriamento e de tratamento da água, e da operação destes dispositivos, com a utilização de uma única equipe e sistema de radioproteção, por exemplo.

Todas as peças que envolvem a movimentação sobem e descem junto com os cestos, facilitando as operações de manutenção ou troca. E, para evitar a degradação pela irradiação, as peças estão definidas para serem confeccionadas em aço ou alumínio e os rolamentos são de aço inoxidável.

Para reduzir os custos e tempos de manutenção, os mancais e os eixos dos cestos são iguais. Os sistemas de transmissão também são idênticos. Isso reduz o número de peças diferentes a serem mantidas em reserva para eventual substituição.

O suporte de fontes foi idealizado para evitar o choque dos cestos com as fontes durante a descida e durante o processo de irradiação, o que também é contemplado pelo projeto dos mancais.

5.2.1 Base porta-fontes

A base porta-fontes é a estrutura fixa no fundo da piscina, que inclui o porta-fontes cilíndrico, projetado estruturalmente para fixar as fontes seladas com dimensões similares ao modelo C-188 fabricado pela MDS NORDION (CALVO, 2004), Canadá. Essa estrutura está representada, em corte, na FIG.23, com algumas fontes seladas montadas nele.

FIGURA 23 - Base porta-fontes com quatro fontes seladas e três de seis colunas representadas.

A coluna central é soldada ao disco base e possui no seu topo o berço para o rolamento do eixo principal, bem como a peça de referência fixa como a engrenagem central, parte do sistema planetário, conforme a FIG.22, uma das opções de movimentação dos cestos.

A principal função dessa base é proteger as partes do conjunto que sejam sensíveis a um eventual impacto na descida do produto. Uma eventual perda de controle na descida do conjunto principal tem as tensões do impacto distribuídas pelo disco inferior, protegendo o fundo da piscina, por exemplo.

A base porta-fontes é composta de:

- a) Um disco base, preso ao fundo da piscina por grampos de fixação, com trilhos circulares e concêntricos que atuam como limitadores para um eventual desalinhamento dos eixos dos cestos;
- b) Um anel porta-fontes, que é mantido estruturalmente solidário à base por meio de colunas que, além de alinhar as fontes seladas, atua como proteção contra impactos verticais;
- c) Seis colunas rígidas que alinham o anel porta-fontes;
- d) Uma coluna central, que alinha o eixo principal do dispositivo, este último sustentando o disco que alinha os cestos em sua posição durante a irradiação.

O anel porta-fontes e o disco base possuem furos alinhados que seguram as extremidades das fontes seladas, mantendo-as na vertical. Os furos têm diâmetro alguns

décimos de milímetro maiores que as extremidades das fontes seladas, facilitando sua montagem. Essas fontes serão montadas verticalmente, por cima do anel, descendo até o respectivo furo do disco base. O vão entre as duas peças deixa a parte das fontes onde estão as pastilhas de cobalto-60 livre de interferências.

O porta-fontes foi idealizado para conter seis grupos de 25 fontes seladas, totalizando o total de 150 unidades.

A FIG.24 apresenta como serão distribuídas as fontes seladas, furos menores e as colunas, nos seis furos maiores.

O diâmetro do porta-fontes que os cestos devem circundar foi determinado de acordo com o número de fontes seladas que venham a ser instaladas. A princípio, considerando fontes seladas novas com média de 50 TBq, ou 13.514 Ci, seriam necessárias 74 unidades para chegar aos 37 PBq de atividade. Optou-se, então, por utilizar um porta-fontes com capacidade para 150 unidades, mesmo sabendo-se que a utilização da capacidade máxima seria circunstancial.

FIGURA 24 - Posicionamento dos furos do anel porta-fontes.

Considerando a robustez do porta-fontes, optou-se ainda pela utilização de seis colunas para sustentar um eventual choque vertical no anel porta-fontes. Isso faz com que se coloquem as fontes seladas em grupos de 25 a cada 60 graus na circunferência do porta-fontes. Com distância de 13 mm entre centros e 31 mm entre o centro da última fonte selada e o centro a coluna mais próxima. Assim, o raio da

circunferência que liga os centros das fontes seladas e os das colunas resulta em 740 mm, e o anel tem 50 mm de espessura (715 mm de diâmetro interno e 765 mm de diâmetro externo) por 50 mm de altura. Os furos possuem correspondentes no disco base, de modo a possibilitar a montagem das fontes seladas de cima para baixo, na posição vertical.

5.2.2 Conjunto principal

O conjunto principal, ou parte móvel do sistema é o mecanismo planetário em si. O mecanismo foi projetado para manter o acoplamento permanente entre os eixos dos cestos por meio de correntes. Este acoplamento só é desfeito na desmontagem do mecanismo, o que assegura maior durabilidade ao conjunto. A rotação dos cestos em relação à rotação do disco principal pode ser realizada de vários modos, sendo que três métodos foram cogitados.

As velocidades de rotação, ou angulares, necessárias para o processo de irradiação de pedras são relativamente pequenas, não ultrapassando dez voltas por minuto de rotação nos cestos, normalmente maior que a velocidade de translação. Isso se deve ao fato de serem necessárias doses da ordem de centenas de kGy. Também devido a este fato, as acelerações podem ser suaves, envolvendo esforços pequenos para se atingir as velocidades de regime ou os deslocamentos angulares discretos, no caso de mudança por passos que pode ser adotado no processo.

Essas velocidades geram baixo arraste fluido-dinâmico no conjunto e, portanto, baixo consumo de energia para manutenção da rotação.

Três métodos de alteração posicionamento angular dos cestos em relação às fontes seladas foram estudados. O primeiro gira os cestos independentemente do movimento de translação, fazendo com que eles girem 360 graus parados em frente a cada fonte selada. O segundo propõe movimento contínuo e sincronizado de rotação e translação. Um terceiro método, utilizando uma catraca para reposicionar o setor dos cestos voltados para o centro do sistema a cada volta do disco principal também foi estudado.

a - Rotação independente do disco e cestos

Nessa opção, um eixo independente do eixo principal é utilizado para acionar a rotação dos cestos. Com isso, o disco principal gira de acordo com o eixo central e os cestos são movidos por um eixo independente, que teria que ficar fixo fora da área usada pelos cestos ou girar junto com o disco. A transmissão do movimento seria feita por corrente diretamente para os eixos dos cestos internos e o sistema de esticador compensaria também a oscilação resultante.

A FIG.25 apresenta um esquema de como poderia ser o sistema de transmissão. Neste tipo de transmissão, todos os cestos estão ligados entre si por meio de correntes e a estrela, ou roda dentada, do eixo motor secundário deve subir com o disco principal para que não haja necessidade de desmontagem das correntes para essa operação.

FIGURA 25 - Esquema de transmissão independente para o movimento de rotação para os cestos.

A principal vantagem em se adotar o movimento independente é a exposição angular uniforme dos cestos. A rotação e a translação podem ter velocidades angulares totalmente independentes. A necessidade de se utilizar dois eixos de motores, sendo um para a rotação e outro para a translação, com acionamento com velocidade variável e síncrona, é a principal desvantagem deste sistema, pois isso deve ser feito

dentro da piscina, complicando o conjunto mecânico e aumentando a área necessária no fundo da piscina.

b - Sistema planetário de engrenagens

A utilização de um sistema planetário de engrenagens possui a vantagem de manter movimento contínuo de rotação e translação com um único eixo de acionamento. O acionamento do sistema é feito através do eixo principal, que gira o disco principal, além de servir de guia de alinhamento para a subida e descida do sistema planetário.

As velocidades angulares do disco principal e dos cestos são determinadas pelos diâmetros efetivos das respectivas engrenagens. Tendo as engrenagens dos cestos orbitando ao redor da engrenagem fixa, o movimento de translação do eixo dos cestos determina sua velocidade de rotação. A relação entre a velocidade de translação e a de rotação determina a distribuição angular das doses. A cada volta do disco principal, um setor de círculo do cesto fica alinhado com uma fonte selada, o que ocorre com todas as fontes do suporte cilíndrico.

A FIG.26 está o esquema para cálculo da velocidade angular dos cestos.

FIGURA 26 - Esquema para cálculo da velocidade angular do cesto.

Na FIG.26, o eixo do cesto gira em torno do centro da engrenagem fixa com velocidade w_2 , no raio $r_1 + r_2$, obtendo a velocidade linear igual a

$$V = w_2 * (r_1 + r_2) \quad (1)$$

Estando o ponto **P** parado, conclui-se que:

$$V = w_1 * r_1 \quad (2)$$

Assim:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{r_1}{r_1 + r_2} \quad (3)$$

Sabendo que a relação de engrenagens é fruto da relação entre o número de dentes, concluimos que:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (4)$$

onde n_1 é o número de dentes da engrenagem fixa e n_2 é o número de dentes da engrenagem dos cestos.

Para cada volta do disco principal, o cesto girará uma fração a mais de volta, dependendo desta relação. O número de voltas do disco principal, necessário para que o cesto seja exposto igualmente em toda sua volta será igual à razão entre o mínimo múltiplo comum (MMC) dos números de dentes e a quantidade de dentes da engrenagem principal, o que tratar-se-á neste texto como número de voltas para uniformização (NVPU). O número de voltas da engrenagem do cesto será igual à razão entre o MMC obtido e o número de dentes dessa engrenagem. Assim, para cada volta do disco principal, um setor de círculo específico do cesto sofrerá influência direta da fonte radioativa alinhada ao ponto P, o que também ocorre com as outras fontes. O número de setores de círculo do cesto a ser considerado é igual ao número de voltas do disco principal acima descrito.

Para que se obtenha a irradiação uniformemente distribuída nos setores do cesto, é necessário que haja um número de voltas múltiplo ao NVPU.

Por exemplo, com uma engrenagem principal com 48 dentes e a do cesto tendo 46 dentes, o MMC obtido será 1104 e o NVPU será 23. Neste caso, o cesto teria 23 posições diferentes de exposição alinhada com cada uma das fontes seladas e a cada 23 voltas do disco principal todos os setores terão sido alinhados ao eixo principal.

c - Sistema de acionamento da rotação dos cestos por catraca

De modo similar ao do sistema acima detalhado, o sistema que utiliza uma catraca para reposicionar o setor dos cestos que é alinhado com o eixo principal, depende apenas do giro do disco principal para acionar a rotação relativa dos cestos.

Embora possa ter pequenos impactos e atritos dos seus componentes, apesar de ser aparentemente mais frágil, um sistema com catraca tem na sua rusticidade a melhor argumentação para sua utilização.

Com movimentação de alguns graus dos cestos para cada volta do disco principal, a catraca que aciona o eixo de um dos cestos internos é impulsionada por um came fixo na coluna central da base porta-fontes. Nesse caso, tendo muito poucas fontes seladas, uma carga com poucos cestos a serem irradiados pode ter o processo abreviado ao parar o disco principal e acionar a catraca com o uso de um sistema alternativo, utilizando cabos de aço ou hastes simples.

Essa vantagem também pode ser obtida com o sistema de movimentação independente, mas a necessidade de dois eixos de acionamento rotativo ao fundo da piscina deixa a opção mais difícil de ser adotada.

FIGURA 27 - Esquema da catraca apresentando o giro da roda dentada inverso à translação de seu eixo em torno do eixo fixo do came.

A FIG.27 apresenta a roda dentada, que é fixa ao eixo de um dos cestos internos, a catraca, que é fixa em uma barra de transmissão e cujo pivô é também fixo ao disco principal. O came de acionamento é fixo na coluna central da base porta-fontes e aciona a outra extremidade da barra de transmissão.

Diferentemente do sistema com engrenagem principal, em que todos os cestos internos são acionados por ela, a catraca apenas altera a posição angular de um cesto, que deverá acionar os outros cinco, além dos cestos externos, e assim a cada volta todos os cestos são girados poucos graus.

Em comum, os dois sistemas apresentam a necessidade de se ter um número múltiplo de voltas no disco principal para se obter a irradiação equalizada em todos os setores dos cestos.

A FIG.28 apresenta o sistema com a catraca, tendo como diferença em relação à FIG.22 a ausência da engrenagem central e a presença da catraca simplificada. O sistema de conexão com os cabos de subida e descida do conjunto principal também foram substituídos, nesta figura, pelo sistema de flanges montadas.

FIGURA 28 - Dispositivo planetário com catraca de acionamento do posicionamento angular dos cestos.

d - Sub-sistema de subida/descida do dispositivo principal

O peso total do dispositivo principal, estimado em menos de 700 kg permite adoção de um sistema de elevação com o uso de cabos de aço, ou correntes. O eixo principal, desmontável em duas ou mais partes, deve ficar entre os dois cabos, ou duas correntes utilizadas para içar o dispositivo principal. A duplicidade necessária dos cabos é aproveitada para que um seja, além de auxiliar, reserva do outro em caso de ruptura. No dispositivo principal, um sistema de flanges, encaixadas por meio de uma flange intermediária bipartida, garante a conexão com folgas para que a flange externa possa ficar imóvel enquanto a interna gira. Para garantir isso, a montagem dos cabos em “V”, com roldanas afastadas de modo que com o dispositivo na posição de irradiação, ao menos um dos cabos fique rente à lateral da piscina, assegurando que as extremidades dos cabos não girem com o disco principal. O esquema apresentado na FIG.29 apresenta como deverão ser montados os cabos de aço ou correntes. A FIG.30 apresenta detalhes do sistema de flanges utilizado.

FIGURA 29 - Sub-sistema de elevação em um irradiador com piscina própria, com proporções não mantidas para a representação do conjunto.

Na representação esquemática acima, o acionamento do elevador não foi representado. Por ter que elevar um peso máximo da ordem de 700 kg, especula-se a utilização de sistema similar ao do elevador do rack de fontes do Irradiador Multipropósito do CTR. O acionamento do elevador, motor e as roldanas citadas anteriormente são presos entre si por meio de um perfil em I, que pode ser a trave de um pórtico montado sobre a piscina, ou uma barra presa ao teto da câmara de irradiação de um irradiador comercial onde o sistema de irradiação de pedras possa ser instalado. De modo a manter altura suficiente para permitir a montagem e desmontagem dos cestos com movimentos ergométricos, o dispositivo deve ser elevado até que sua parte inferior

atinja 1400 mm. Assim, um vão de 2500 mm ou 2,5 m entre o conjunto motor-elevador e o piso em volta da piscina é recomendado.

No irradiador com piscina própria, uma mureta de alvenaria é utilizada para proteger a água da piscina tal qual a mureta de um poço e, com materiais e estrutura adequadas, também pode sustentar uma tampa bipartida que abre para a passagem do dispositivo principal, manutenção da piscina e operações de carga e descarga das fontes seladas. A tampa pode ter espessura suficiente para servir como mesa auxiliar na montagem dos cestos no dispositivo.

FIGURA 30 - Sistema de flanges que prendem o disco principal aos cabos ou correntes do elevador.

Com o aparato apresentado na FIG.30, podem ser montadas correntes ou cabos, sendo que esses últimos devem possuir um olhal ou um laço em suas extremidades para a fixação no parafuso ou pino a ser montado na flange de fixação de olhais. O sistema de encaixes assegura a impossibilidade de desacoplamento dos cabos durante as operações de subida e descida e a folga entre a flange bipartida e o gargalo do corpo principal garante o giro livre do disco em relação aos cabos ou correntes.

Para a montagem do aparato é necessário seguir as etapas abaixo:

- ✓ Passar a parte superior do corpo principal pelo furo central do disco principal, prendendo essas peças com seis parafusos de aço (o corpo principal tem diâmetro da parte superior ligeiramente menor que o do encaixe do disco principal, este tendo ajuste sem folga);

- ✓ Passar a flange de fixação de olhais, também com pequena folga no diâmetro, pela extremidade superior do corpo principal, descendo até encostar no disco principal;
- ✓ Montar a flange bipartida, com folga de 0,5 mm a 1,0 mm no diâmetro interno, em relação ao diâmetro do gargalo do corpo principal, acima da flange de fixação dos olhais;
- ✓ Encaixar a flange bipartida na flange de fixação de olhais, com folga mínima, ou até pequena interferência, entre as superfícies de contato.

As duas últimas etapas podem ser realizadas com a utilização de processo de resfriamento da flange bipartida para facilitar o encaixe final, que também pode ser feita com superfícies levemente cônicas.

Na FIG.30, bem como em todos os esquemas apresentados, não estão representados os detalhes de arredondamentos e chanfros para aliviar as tensões e auxiliar as montagens. Os detalhes devem fazer parte do projeto final das peças.

5.2.3 Determinação de parâmetros gerais

Para um projeto de concepção, faz-se necessária a determinação de alguns parâmetros que demonstrem a sua capacidade funcional.

A uniformidade de doses obtida em um cesto de pedras, por exemplo, e a capacidade de irradiação esperada para o conjunto são parâmetros imprescindíveis para que se inicie o projeto básico e, a seguir, o detalhamento final do projeto. Para isso, uma estimativa das dimensões do cesto e o mapeamento das doses de um cesto carregado com pedras, girando na presença de uma ou mais fontes seladas, é suficiente para completar a demonstração da viabilidade física e estimar os custos de implantação e operação do irradiador.

Outras características independem destes resultados, pois são inerentes à simples presença do cobalto-60 no irradiador. A quantidade de calor gerada pelo cobalto-60 no fundo da piscina e a sua profundidade são dois parâmetros a serem definidos. O procedimento para a determinação das dimensões dos cestos será discutido mais adiante.

a - Calor gerado pelo cobalto

Entre as definições de parâmetros do projeto de concepção, está a capacidade máxima de cobalto-60, fixado em 37 PBq ou 1.000.000 Ci. Estando no fundo da piscina, essa quantidade de cobalto gera radiação gama e beta que devem ser quase totalmente absorvidas pela água e estruturas ao redor que termina sendo transformada em calor. As quantidades de energia que não podem ser absorvidas pelo entorno das fontes são a fuga de radiação pela superfície da água, desprezível se adotarmos a profundidade admitida para que a taxa de exposição na superfície inferior a $0,5 \mu\text{Gy/h}$, admitida para uma pessoa comum, além da energia da luz gerada pelo efeito Cherenkov pela superfície, que também é desprezível.

Considerando uma piscina termicamente isolada e desprezando as fugas mencionadas, toda a energia gerada pelo decaimento do cobalto-60 é mantida dentro da piscina e o calor resultante deve ser retirado para que não haja aquecimento excessivo da água.

A energia resultante do decaimento do Cobalto-60 é a soma das energias das emissões gama, de 1,33 MeV e 1,17 MeV, e da energia da radiação beta, com máximo de 315 keV. Para simplificar, considerar-se-á que essas emissões, com abundância maior que 99%, ocorrem em todos os decaimentos. Assim, a energia total emitida por decaimento será de 2,815 MeV.

Como um eV equivale a $1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$, teremos para cada decaimento a emissão de $4,51 \times 10^{-13} \text{ J}$ por decaimento. Para uma atividade de 37 PBq, ou 37×10^{15} decaimentos por segundo, teremos a geração de 16,6 kJ/s ou 16,6 kW.

Considerando apenas a energia dos raios gama, teremos 2,5 MeV, ou $4,005 \times 10^{-13} \text{ J}$, por decaimento, o que para a atividade de 37 PBq resulta em 14,8 kW.

Assim, sem considerar a transmissão de calor pelas paredes ou superfície da piscina, teríamos que dissipar 16,6 kW quando a atividade do irradiador estiver no seu máximo, ou seja, 37 PBq, ou 1.000.000 Ci.

Portanto, um sistema de arrefecimento com essa capacidade de refrigeração seria recomendado para manter controlada a temperatura da piscina, uma vez que as perdas de calor não consideradas acima constituiriam o fator de segurança necessário.

b - Profundidade da piscina

A profundidade da piscina foi calculada por meio do software Microshield (NEGIN, 1986).

A dose foi calculada para a borda de uma piscina de 1,2 m tendo uma única fonte de 37 Pbq (1.000.000 Ci), pois esta seria, hipoteticamente, a posição de maior taxa de doses devido à reduzida auto-blindagem da fonte selada.

A geometria adotada foi a de uma fonte cilíndrica com dimensões mínimas e blindagem axial de água acima dessa fonte, tendo paredes de concreto. O *buildup* foi calculado para a água. Para ser conservativo no cálculo da blindagem, nenhuma outra estrutura foi considerada, bem como a utilização das dimensões mínimas da fonte.

Com essa configuração, chegou-se à conclusão de que é necessário uma lâmina de água de 4,75 m de espessura acima da fonte para que as taxa de dose na linha d'água e borda da piscina fique abaixo de 0,5 $\mu\text{Gy/h}$, com a carga máxima de cobalto.

Como a fonte selada tem pouco menos de 0,5 m de comprimento, por estes resultados adotar-se-á uma profundidade mínima da piscina de 5,0 m. Na prática, a área em volta da piscina é considerada área controlada, com a presença de trabalhadores envolvidos com a irradiação, por uma fração do tempo de trabalho, o que aumentaria o limite de 0,5 $\mu\text{Gy/h}$, mas, mantendo esse limite, a área em volta da piscina do irradiador pode ser liberada, havendo apenas as barreiras para impedir uma eventual invasão, ou queda, de um indivíduo na piscina.

c - Estimativa das dimensões dos cestos

Para estimar as dimensões dos cestos, foi utilizado o aplicativo Cadgamma (OMI, 2000), com adaptação para calcular as doses em ambiente submerso, ou seja, considerando as perdas devido à presença da água ao invés do ar atmosférico nos espaços livres.

A otimização considera, entre outras características, o peso máximo do cesto carregado abaixo de 25 kg, de modo que ele possa ser manipulado sem sistemas auxiliares complexos, como guinchos ou elevadores. As dimensões também foram definidas para que o fator de uniformidade de doses estimada fosse limitada a 3,0 na simulação. Isso levaria a termos doses três vezes maiores nas proximidades do diâmetro

externo do cesto do que no centro, próximo das faces superior e inferior, conforme a FIG.5.

Como resultado, os cestos têm sua altura definida em 380 mm, ligeiramente menor que a altura útil das fontes seladas e com diâmetro máximo de 210 mm. E o diâmetro mínimo foi definido como 190 mm, mantendo um volume interno mínimo de 10 litros.

Esse estudo foi realizado com o Cadgamma para placas com espessura igual ao diâmetro dos cestos, irradiadas durante a metade do tempo total de exposição com uma face voltada para a fonte e a outra metade com a face oposta.

Assim, as distribuições obtidas podem ser consideradas simulações qualitativas razoáveis para a distribuição das doses nos cestos. A ressalva é a redução no gradiente radial de doses, resultando em taxas de doses ligeiramente maiores com a penetração.

FIGURA 31 - Esquema da simulação utilizada no levantamento da uniformidade de doses, apresentando a exposição em uma face da placa e o resultado com a irradiação em ambas as faces.

As simulações foram feitas com uma única fonte selada e sem interferências entre a fonte e a placa, submersos na água. A FIG.31 apresenta o esquema da simulação.

A FIG.32 apresenta o resultado das simulações, com a razão entre a dose no ponto de dose máxima e a do ponto de dose mínima, para placas com 190 mm e 210 mm de espessura. O fato de ser cilíndrico e em rotação deve levar os valores das doses nos cestos a terem fatores de uniformidade menores. No entanto, a relação entre

as uniformidades de dose, com a variação de diâmetros e das distâncias para a fonte selada pode ser extrapolada, pois a simulação considera apenas a penetração no plano perpendicular à face do produto paralelo ao eixo da fonte selada. A densidade aparente do produto utilizada nas simulações é de $1,8 \text{ g/cm}^3$ e os cestos foram posicionados de modo a ficarem verticalmente centrados em relação à fonte selada.

FIGURA 32 - Comportamento da uniformidade de dose de uma placa em frente a uma fonte selada de cobalto-60 em relação à distância da fonte selada.

Na FIG.32 os fatores de uniformidade de doses mantêm uma diferença relativa média de 9,2%, com 8,9% a 60 mm, aumentando até 300 mm e passando a diminuir até 1,0 m, com tendência a estabilizar em uma diferença próxima de 8,2%.

As radiações espalhadas pela água se somam às radiações espalhadas no material irradiado para formar o acréscimo na dose total, conhecido como *buildup*, em cada ponto no volume do produto. Assim, podemos verificar que o *buildup* nas doses das camadas superficiais voltadas para a fonte se devem quase exclusivamente à camada de água entre essa superfície e a fonte enquanto que nos pontos mais profundos, o *buildup* devido à penetração no material se somam ao da água. No ar, essa contribuição é desprezível.

Para posições mais próximas à fonte, a dimensão da fonte também contribui para que a redução nas doses devido à distância do ponto irradiado tenha uma contribuição menor, reduzindo as diferenças entre as doses na superfície e no centro do produto. Considerando este fato e o *buildup* gerado por uma camada mais fina de água

chega-se a uma distância onde a uniformidade de doses é máxima, passando a diminuir com a aproximação da fonte. Isso explica a inflexão nas curvas apresentadas na FIG.19, para distâncias abaixo de 100 mm.

A variação no diâmetro dos cestos, de 190 mm para 210 mm, leva a um aumento de 22% na sua capacidade volumétrica e o aumento esperado no fator de uniformidade de doses, utilizando o Cadgamma para essa estimativa, varia entre 8% e 10%. Isso sugere a adoção do diâmetro maior pois, em média, a uniformidade de doses atenderia ao limite imposto e a razão entre o volume e a uniformidade de doses teria valores mais interessantes.

Embora possa pender para a adoção dos cestos de maior diâmetro, a razão entre a capacidade cúbica e a uniformidade de doses esperada não deve ser considerada como decisiva, pois esta simulação não considera a montagem total, onde a dose real obtida nos cestos tem a interferência dos outros cestos e do porta-fontes. Assim, outras considerações devem ser feitas antes de se adotar um diâmetro para todos os cestos, ou um para a órbita interna o outro para a externa.

Com isso, a definição exata do raio dos cestos foi realizada de acordo com as necessidades mecânicas e geométricas do dispositivo.

Conforme indicado na seção 5.1, as fontes são dispostas em círculo, com raio de 740 mm.

Adotando o diâmetro de 0,19 m ou 190 mm, além de uma distância de 60 mm entre a superfície externa dos cestos e os centros das fontes seladas, teremos o diâmetro da órbita externa de diâmetro de 1050 mm e a área necessária no fundo da piscina teria um diâmetro de 1240 mm. Com isso, podemos montar 15 cestos equidistantes, com distância entre centros de 218,3 mm ou 28,3 mm de folga entre eles.

Ao se adotar 210 mm como diâmetro do cesto e mantida a distância para o centro das fontes seladas, teremos 14 cestos com 238,0 mm de distância entre centros ou 28,0 mm de folga, numa órbita de diâmetro de 1070 mm e área necessária com diâmetro de 1280 mm.

Estudando também a órbita interna, ou central, e mantendo distância de 60 mm acima mencionada, teremos uma órbita com diâmetro de 410 mm para o cesto de 210 mm de diâmetro. Com cinco cestos, a distância entre centros será de 241,0 mm, ou 31,0 mm de folga. Com 190 mm, com seis cestos em uma órbita de 430 mm, a

distância será de 215 mm e a folga de 25 mm. O diâmetro dos cestos internos não altera a área necessária no fundo da piscina.

A tabela abaixo resume os dados acima, incluindo os cálculos para cestos com diâmetro de 200 mm.

TABELA 12 - Dimensões da geometria de distribuição dos cestos, em mm

Cestos	Diâmetro	Quantidade	Diâmetro da órbita	Distância centro a centro	Folga entre cestos	Diâmetro da área do dispositivo
Externos	190	15	1050	218,3	28,3	1240
	200	15	1060	220,4	20,4	1260
	210	14	1070	238,0	28,0	1280
Internos	190	6	430	215,0	25,0	-
	200	5	420	246,9	46,9	-
	210	5	410	241,0	31,0	-

Com estes resultados, apenas detalhes construtivos podem influenciar na escolha da configuração ideal.

Nesse sentido, a escolha de cinco cestos internos e quinze externos possui a vantagem de ter cada eixo do cesto interno acionar, por correntes, três eixos dos cestos externos, formando cinco conjuntos iguais de transmissão. A adoção de 15 cestos de 190 mm na órbita externa se justifica por necessitar de área menor no fundo da piscina e, principalmente, uma distância entre os cestos montados tal que facilite o manuseio. Nesse sentido, um vão de 28 mm entre cestos é significativamente melhor que 20 mm para manuseio, reduzindo o risco de acidentes locais.

A FIG.33 apresenta como os eixos dos cestos externos e internos estariam conectados por meio de correntes.

FIGURA 33 - Vista superior do disco principal com a conexão entre os eixos dos cestos.

Na FIG.33 são montados cinco grupos com quatro cestos, sendo um da órbita central e os outros três da órbita externa do conjunto. Dessa forma, o tipo de acionamento da rotação dos cinco cestos pode ser por catraca, engrenagem ou até o uso do segundo eixo motor.

A FIG.34 apresenta um esquema do acionamento de cinco catracas, montadas abaixo do disco principal para o acionamento dos cestos da órbita central.

FIGURA 34 - Catracas montadas para acionamento dos cestos.

Na FIG.19, os conjuntos de cestos são acionados individualmente quando a alavanca atinge o ressalto do came. Com isso, a cada 72° de giro do disco principal, um

dos eixos da órbita interna seria acionado, fazendo com que os cestos do conjunto do eixo girem o equivalente a um passo dessa catraca a mais em relação ao disco principal, conforme foi descrito na seção 5.2.3.

Pode-se adotar o mecanismo com um came duplo, com dois ressaltos diagonalmente opostos, ou triplo, com ressaltos a 120°, para que o giro dos cestos seja dividido em duas ou três fases para que os movimentos sejam mais suaves.

c – Dimensões do disco principal

Baseado nas dimensões definidas nos itens anteriores, as dimensões do disco principal resultaram em:

- ✓ Diâmetro da órbita dos eixos dos cestos internos: 410 mm;
- ✓ Diâmetro da órbita dos eixos dos cestos externos: 1050 mm;
- ✓ Diâmetro mínimo do disco 1150 mm.

Além destes diâmetros, a espessura do disco foi definida como tendo 25 mm e sua espessura será definida pela disponibilidade de chapas no mercado. Por exemplo, a COSIPA fabrica chapas de aço largura de 1200 mm, comprimento de 5500 mm e espessura de 25 mm, mas as chapas de 22,4 mm ou até 19 mm, também produzidas pela siderúrgica, poderiam ser utilizadas. A definição da espessura exata deverá ser feita no detalhamento do projeto.

O material a ser utilizado no disco é, inicialmente, aço inoxidável. O peso do disco, tendo 25 mm de espessura, será de aproximadamente a 220 kg, e responderá por mais de 70% do peso total do dispositivo, sem o produto. Uma carga completa de pedras pode chegar a 360 kg. O total, portanto, não deve superar 700 kg.

d – Acionamento do disco principal

O torque necessário para manter a rotação do conjunto é pequeno, pois a velocidade rotação necessária para os cestos é pequena. No caso do mecanismo com cinco catracas, cada conjunto de cestos gira alguns graus a mais por volta em torno do eixo principal, sendo que enquanto um conjunto gira, os outros quatro permanecem parados em relação ao disco principal. Se for utilizado o mecanismo de engrenagens, a velocidade angular dos cestos, todos girando em sincronia, será de duas a três vezes a velocidade do disco principal.

Como o tempo total esperado de irradiação é maior que uma hora, ainda que com a capacidade máxima de cobalto e para doses de 100 kGy, dose citada em uma dissertação sobre irradiação e tratamento térmico de ametistas (MONTEIRO, 2001) e, sendo necessário um número múltiplo ao de voltas suficientes para um ciclo completo dos cestos, ou seja, igual ao número de dentes da catraca ou o NVPU, no caso de engrenagens, dificilmente será exigida uma velocidade maior que três rotações por minuto no disco principal, o que resultaria em 180 voltas por hora. Nesta velocidade de rotação, a velocidade periférica máxima dos cestos será menor que 0,26 m/s, caso em que a velocidade dos cestos é da ordem de 2,1 vezes a velocidade do disco principal. Se fosse utilizado o mecanismo de catraca, a velocidade periférica média seria de 0,20 m/s, pois os cestos só girariam por uma fração do tempo.

Para velocidades da ordem de uma a três rotações por minuto, variável manualmente ou por meio de computador, pode-se utilizar um conjunto moto-redutor com rosca sem fim e dupla redução, tendo relação final da ordem de 1:2000, acoplado a um motor trifásico de 4 pólos com 1 kW e um sistema de acionamento por inversor de frequência.

5.3 Análise de viabilidade econômica

O projeto de concepção do irradiador permite, entre outras características, a sua instalação na região próxima da zona de mineração, por necessitar de capital reduzido, sem a utilização de grandes estruturas prediais e blindagens específicas. A sua instalação é simples e rápida, bem como o seu comissionamento e operação. Estando próximo às minas ou em um ponto de beneficiamento e comercialização, os custos da logística de transporte são reduzidos, tornando o produto mais competitivo.

O investimento de capital estimado para o irradiador se concentra no dispositivo de irradiação, na piscina de armazenamento das fontes, deionizador, resfriador da água, sistemas de segurança radiológica exigidos pela legislação vigente e sistema de acionamento e elevação do dispositivo principal. O custo total foi estimado como sendo menor que US\$ 150.000,00, sem as fontes de cobalto, dos quais, US\$ 40.000,00 seriam utilizados para o dispositivo planetário e a base porta-fontes. Incluindo as fontes de cobalto-60, para uma atividade total de 7,4 PBq (200 kCi), o capital inicial passa a ser de US\$ 550.000,00, pois o preço das fontes seladas de cobalto-60 tem se mantido em US\$ 2,00 por Ci.

Como custos financeiros, tomando o investimento inicial acima, e aplicando o método de cálculo sugerido por Morrison (MORRISON, 1989), obteremos o valor fixo anual de 12% do montante total investido, ou seja, US\$ 66.000,00.

A operação do irradiador exclusivo para pedras, classificado pela CNEN como sendo do grupo I (CNEN-NE 6.02, 1998), exige a dedicação de pelo menos um supervisor de radioproteção e, como substituto do supervisor, um técnico de nível superior treinado e habilitado ou um segundo supervisor, também deve estar disponível (CNEN-NN 3.01, 2005). Para a montagem e desmontagem dos cestos carregados, alguns funcionários devem ser deslocados de outras áreas, como auxiliares esporádicos, uma vez que essas operações devem ser feitas em intervalos de várias horas, com duração máxima de quinze minutos.

Tendo um supervisor de radioproteção e um operador, com 100% de dedicação à operação do irradiador, e desconsiderando o salário dos auxiliares para a carga e descarga do dispositivo sendo deslocados de outras áreas da empresa, bem como o coordenador de atividades, para a operação segura do irradiador, os custos com mão de obra seriam da ordem de US\$ 50.000,00 por ano (1 US\$ = R\$ 2,00).

A manutenção, segundo Morrison, seria de 3,5% do investimento, excluindo-se as fontes de cobalto-60 que não necessitam de manutenção, terá um custo de US\$ 5.250,00 ao ano.

A reposição de cobalto-60 seria de 12,5% de 7,4 PBq (200.000 Ci), ou 0,925 PBq (25.000 Ci) por ano, resultando em US\$ 50.000,00 anuais.

Somando estes valores, obtemos um custo operacional estimado de US\$ 171.250,00 por ano.

Para a operação de 8000 horas/ano, tem-se um custo por hora de operação da ordem de US\$ 21,41.

Considerando-se a capacidade de processamento estimado no item 5.1.2 de 54.000 kg por ano, o custo por kg irradiado com dose mínima de 600 kGy fica em US\$ 3,17. Esse custo pode ser dividido em US\$ 2,17/kg para a operação e US\$ 1,00/kg para reposição anual do cobalto-60.

Uma empresa que pague US\$ 10,00 por kg irradiado, ao instalar um irradiador em linha com a produção com 74 PBq de carga de cobalto economizaria US\$ 6,83 por kg irradiado. E ainda economizaria os custos da logística de transporte. A economia anual dessa instalação, com uma média de 54.000 kg de gemas irradiadas

anualmente, chegaria a mais de US\$ 368.000,00 de redução nos gastos, constituindo um valor maior que o dobro do custo da implantação do irradiador, sem as fontes seladas.

Operando com 60% da capacidade máxima de irradiação, o valor cai para US\$ 221.000,00.

Implantando o irradiador próximo da zona mineradora ou próximo do local onde as pedras são processadas para comercialização, os custos de transporte e a logística associada seriam evitados, o que aumentaria o montante anual economizado.

Uma das características do sistema de irradiação proposto é a sua independência do local onde é montado, bastando apenas a existência de uma piscina com profundidade suficiente para a blindagem das fontes de cobalto-60, ou a montagem de uma nova piscina dentro de um ambiente apropriado. Com isso, a mudança do irradiador para um novo local pode ser realizado com custo muito baixo, não chegando a US\$ 20.000,00, pois só a piscina não seria reaproveitada. Assim, se a zona de mineração ou de processamento e comercialização onde o irradiador estiver instalado for desativada, a mudança do irradiador não seria onerosa.

6 CONCLUSÕES

O projeto de concepção, objeto deste trabalho, contemplou os requisitos necessários para ser montado no fundo da piscina de armazenamento de fontes de cobalto-60 de irradiadores comerciais ou piscina construída para o dispositivo, que é um pouco menor e mais simples. Por se tratar de um sistema para irradiação submersa, as paredes de contenção da radiação são desnecessárias, bem como a parte do sistema de radioproteção que envolve os requisitos para a fonte exposta.

O dispositivo básico de irradiação, pelos resultados obtidos e maior controle da distribuição de doses, será aproveitado para a construção de um outro sistema a ser utilizado junto com as próprias fontes de irradiadores já instalados, com indicação de aumento real de eficiência e da qualidade na irradiação de pedras.

O sistema, além de ter custos operacionais e de implantação bastante atraentes, pode ser mudado para as áreas novas de mineração com pouco investimento, ou seja, apenas construindo uma nova piscina em lugar apropriado.

A adoção do sistema de irradiação dedicado ao tipo de produto, neste caso, se justifica plenamente. Isso abre perspectivas para o estudo de outros sistemas dedicados, podendo viabilizar economicamente outras aplicações.

Como sugestão para trabalhos futuros ficam: a construção do irradiador de gemas, instalado em piscina própria ou na de um irradiador comercial; estudos de irradiação submersa de pedras preciosas com o melhor controle oferecido pelo dispositivo, em termos de dose recebida nas pedras e a investigação completa da relação entre a irradiação em ambiente submerso e a realizada em ambiente atmosférico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AINES, R. D., ROSSMANN, G. R., Relationships Between Radiation Damage and Trace Water in Zircon, Quartz, and Topaz, *American Mineralogist* vol. 71, 1186-1193, 1986.
- AMERICAN GEM TRADE ASSOCIATION, *Gemstone Enhancement Manual*, Edition 6.1, 1997.
- AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, New Gamma Ray buildup Factor Data for Point Kernel Calculations. (ANS-6.4.3 Standard Reference Data, Oak Ridge, 1991)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *Guide for Estimating Uncertainties in Dosimetry for Radiation Processing*, 1995 (ASTM Standard E1707) .
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *Guide for Selection and Calibration of Dosimetry Systems for Radiation Processing*, 1994 (ASTM Standard E1261).
- CALVO, W.A.P., RELA, P.R., SPRENGER, F.E., COSTA, F.E., OMI, N.M., SILVA, L.G.A. , *A small size continuous run industrial gamma irradiator*, Radiation Physics and Chemistry, Volume 71, Issue 1-2, p. 563-565, 2004.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, 2005 (CNEN-NN 3.01).
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Licenciamento de Instalações Radiativas*, 1998 (CNEN-NE 6.02).
- FAVACHO, M., LICCARDO, A. CASTAÑEDA, C., *Gemas de minas gerais*, Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo Minas Gerais, 2001, cap. 3, tratamento em gemas, p.53-73.
- GRAY*STAR INC., Genesis Irradiator, disponível em <<http://www.graystarinc.com/genesis.html>>, Acesso em 4 de maio 2006.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*, 1992 (IAEA Safety Series No. 107).
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Practice for use of a polymethylmethacrylate dosimetry system*, 2002 (ISO/ASTM 51276:2002 (E)).
- MONTEIRO, C.V., *Caracterização das Ametistas Brasileiras em Face aos Efeitos da Radiação Gama e seu Tratamento Térmico*, 2001, Dissertação, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Rio Claro, SP.
- MORRISON, R.M, *An economic Analysis of Electron Accelerators and Cobalt-60 for Irradiating Food*. United States Department of Agriculture, June 1989 (Technical Bulletin no. 1762).
- NASSAU, K, *The Physycs and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color*, Wiley, NY, 1983

NASSAU, K. Gemstone Enhancement, Butterworths Stochman, MA, 1984.

NASSAU, K., The Origin of Color in Minerals, *American Mineralogist*, vol 63, 219-229, 1978.

NEGIN, C.A., *Microshield - A Microcomputer Program for Analyzing Dose Rate and Gamma Shielding*, American Nuclear Society, . v. 53 p. 421-422, 1986.

OMI, N.M., *Desenvolvimento de um Aplicativo para Simulação de Doses em Sistemas de Irradiação Gama*, 2000, Dissertação, INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, São Paulo.

PEARL DISTRIBUTORS, *Pearl Encyclopedia::Irradiation*, disponível em <<http://www.pearldistributors.com/treatments-irradiation.php>>, acesso em 04/08/2006.

PICOWAVE TECHNOLOGY. Proposta Comercial e Catálogo técnico *BPI PALLET IRRADIATOR™*, 1988.