

Projeto de Pesquisa Tecnológica

Dosímetros Semicondutores aplicados em
Processamento de Materiais por
Radiação Gama e Elétrons

Programa 2 - APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Atividade 240 - Instalações e Equipamentos para Aplicações de Técnicas Nucleares

Dr^a Josemary A. C. Gonçalves
CTR
IPEN-CNEN/SP

Resumo

O projeto de pesquisa proposto contempla o desenvolvimento e calibração de dosímetros semicondutores para medidas *on-line* de taxas de dose de radiação gama e elétrons presentes nas aplicações de Processamento por Radiação conduzidas no Laboratório de Dosimetria de Processos Industriais (LDPI) do Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP).

O detector do sistema dosimétrico para raios gama será escolhido entre diodos comerciais, como por exemplo o SFH00206 da Siemens e os S2506-4 e S3994-01 da Hamamatsu, cuja caracterização elétrica e estudo da sua resposta na detecção de radiação gama proveniente do ^{60}Co foram objeto de pesquisa anteriormente desenvolvida em nosso grupo. Os resultados obtidos evidenciaram a possibilidade de emprego destes diodos como dosímetro de radiação gama para doses absorvidas de até 200 Gy, sem a manifestação aparente de danos de radiação.

Os diodos que serão investigados para dosimetria de elétrons serão os comerciais S11141-10 da Hamamatsu e aqueles desenvolvidos no âmbito da colaboração RD-50 do Centro de Pesquisas Nucleares da Europa (CERN) - que tem o objetivo de produzir dispositivos de Si resistentes a danos de radiação. Serão particularmente contemplados neste projeto os diodos epitaxiais (EPI) desenvolvidos no Instituto de Física Experimental da Universidade de Hamburgo (Alemanha) pelo significativo aumento de resistência a danos de radiação por eles apresentado em comparação aos demais dispositivos estudados até o presente.

No entanto, apesar do desempenho dos diodos comerciais escolhidos e epitaxiais indicar o seu grande potencial para a monitoração de processos de irradiação para medidas diretas de taxas de dose e da dose absorvida, a sua utilização rotineira como dosímetro no LDPI requer a introdução de procedimentos de calibração no tocante à função resposta do dispositivo, reprodutibilidade, estabilidade, faixa operacional de dose e precisão exigidas pelas práticas padronizadas pela *American Society for Testing Materials* (ASTM).

Nos sistemas dosimétricos que serão desenvolvidos a aquisição dos sinais de fotocorrente gerados nos diodos será feita por um eletrômetro dotado de saída GPIB. A transferência simultânea dos dados adquiridos a um microcomputador viabilizará a observação em tempo real da estabilidade do processo de irradiação, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado à taxa de dose.

Qualificação do principal problema a ser abordado

I. Dosímetros para Radiação Gama (doses até 100 Gy)

A utilização de radiação gama em processos de esterilização de produtos médicos, preservação de alimentos e alterações de propriedades de materiais poliméricos tem incentivado o aumento do número de irradiadores industriais responsáveis pela geração de doses elevadas quanto algumas centenas de kGy [1-5]. Nestas instalações frequentemente são utilizadas fontes de ^{60}Co cuja disposição origina um campo de radiação de intensidade variável que permite obter a dose desejada através de um compromisso entre a posição e tempo de exposição do material irradiado.

A dosimetria de elevadas doses absorvidas desempenha um papel importante tanto na caracterização do irradiador quanto na definição e validação do procedimento de irradiação [6-7]. Esta validação demanda a determinação das doses mínimas e máximas absorvidas, bem como a distribuição de dose no produto irradiado, o que requer a utilização de dosímetros durante toda a sua exposição.

Além da taxa de dose absorvida, fatores externos como umidade, temperatura de irradiação e de armazenando dos dosímetros (antes e após a irradiação), sensibilidade à luz, entre outros, podem afetar significativamente a resposta de dosímetros de rotina de forma complexa, o que impede a introdução de fatores diretos de correção nas medidas [8-11]. Além disto, fica implícito, que a calibração de um sistema dosimétrico de rotina é específica para cada campo de irradiação, não podendo ser utilizada de forma geral nos diferentes irradiadores existentes.

Exemplos de dosímetros de rotina frequentemente utilizados são os baseados no polimetilmetacrilato (PMMA - com ou sem corantes) [12-13], triacetato de celulose (CTA) [14] e filmes radiocrômicos finos [15-17], cujos limites operacionais se estendem em ampla faixa de dose. No entanto, a medida do parâmetro dosimétrico (absorvância específica) destes dosímetros só pode ser feita após o término da irradiação, não permitindo a monitoração do procedimento e a correção de possíveis alterações durante a exposição do produto.

Por outro lado, o nosso maior envolvimento com as atividades de processamento por radiação rotineiramente oferecidas pelo Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), evidenciou a necessidade de desenvolvimento de dosímetros com características adequadas para a dosimetria gama em aplicações que resultam em doses totais no intervalo de 5 Gy a 100 Gy. Esta faixa de dose tem sido frequentemente utilizada em processos de irradiação de materiais fósseis, cristais, polímeros conjugados e também em vários estudos biológicos, mediante o emprego de fontes de ^{60}Co disponíveis nos Irradiadores do CTR.

A dosimetria destes processos, realizada no LDPI, tem se baseado no emprego de dosímetros termoluminescentes (TLD) e radiocrômicos. No entanto, em acordo com a literatura [18], o dosímetro TLD de sulfato de Cálcio dopado com Dysprósio, apresenta resposta linear e estável para doses de 50 mGy a 8 Gy, sendo possível utilizá-lo para doses mais elevadas, na região de supralinearidade. Por outro lado, o dosímetro radiocrômico utilizado, o *gafchromic* HD 810 (*Nuclear Associates*), adequado para doses de 1Gy até 50kGy, apresenta para doses baixas (inferiores a 100 Gy) alterações nos espectros de absorvância do material que constitui o dosímetro (camada de polyester), as quais comprometem a precisão e sua estabilidade de resposta [19,20]. Vale a pena observar que os dosímetros radiocrômicos de polimetilmetacrilato (PMMA), frequentemente utilizados como dosímetros de rotina em processos de irradiação, nomeadamente o *Gammachrome* (0,1 a 3 kGy), *Red Perpex* (5 a 50 kGy) e o *Amber* (1- 30 kGy), são adequados para medidas de doses superiores a 100 Gy, não atendendo, portanto, às exigências das aplicações dosimétricas supracitadas.

A necessidade de dotar o LDPI do IPEN-CNEN/SP de dosímetros com características adequadas para medidas de doses inferiores a 100 Gy, aliada à experiência do nosso grupo no estudo das condições operacionais de vários diodos de Si [21-30], nos motivou a propor este projeto que objetiva o desenvolvimento de um sistema dosimétrico baseado no emprego de diodos comerciais de Si.

Uma análise das características dos diodos comerciais quanto à densidade de corrente de fuga, tensão de depleção total, capacitância e, principalmente robustez, nos conduziu à escolha para uso como dosímetro de raios gama, em primeiro plano, os fotodiodos SFH-00206 (Siemens) e o S2506-4 da Hamamatsu, ambos do tipo PIN. Um outro aspecto que também contribuiu para a escolha deste tipo de dispositivo foi o seu baixo custo e também a grande disponibilidade de oferta no mercado nacional e internacional. Apesar de secundária, a importância destes últimos parâmetros reside na viabilização futura da aplicação destes diodos como dosímetros de rotina em processos de irradiação com doses máximas de até 100 Gy.

Nesta aplicação, até mesmo a pequena área útil ($\cong 7,5 \text{ mm}^2$) destes dispositivos representa uma vantagem, uma vez que tornará possível a realização de medidas instantâneas de dose sem que ocorram significativas alterações no campo de radiação presente nas proximidades do irradiador devido às fontes de ^{60}Co .

Como se depreende do que foi exposto, a inexistência de dosímetros comerciais de rotina que permitam a monitoração constante de processos de irradiação corrobora a necessidade de se dotar o LDPI de sistemas dosimétricos para medidas instantâneas de baixas doses com reprodutibilidade, estabilidade e precisão exigidas pelas práticas padronizadas pela *American Society for Testing Materials* (ASTM).

II. Dosímetro de Elétrons (doses de 10 a 300 kGy)

No âmbito de nosso esforço de desenvolvimento de instrumentação voltada para a dosimetria de altas doses em irradiação industrial, o presente projeto contempla também a aplicação como dosímetros de elétrons para doses de até algumas centenas de kGy de diodos de Si comerciais S11141-10 da Hamamatsu e aqueles crescidos pelo método epitaxial (EPI), resistentes a danos de radiação. Estes últimos tratam-se de dispositivos favoritos a utilização no Super LHC pelo enorme aumento de resistência a danos de radiação por eles apresentado em comparação aos demais dispositivos [31-35]. Esta característica dos diodos do tipo EPI tem sido atribuída principalmente a um efeito de compensação entre a geração de aceitadores e a criação de doadores, única em materiais epitaxiais. Para irradiações em alto fluxo ($6.10^{15} \text{ cm}^{-2}$) foi relatada uma queda na eficiência de coleta de cargas para apenas 80% do valor máximo.

Considerando as vantagens de elevada resistência a danos de radiação e a excepcional estabilidade dos sinais de corrente apresentada pelos diodos EPI, pretende-se neste projeto utilizar estes diodos especiais na confecção de sondas dosimétricas para monitoração *on-line* de procedimentos de irradiação com elétrons. Os diodos comerciais da Hamamatsu terão seu desempenho comparado aos diodos epitaxiais considerando seu preço e disponibilidade no mercado internacional.

A motivação adicional para esta linha de pesquisa deriva também da inexistência de sistemas comerciais para medidas *on-line* de altas doses de elétrons utilizando diodos de Si para a detecção direta destas radiações, dado o elevado dano de radiação sofrido pelo semiconductor crescido pelas técnicas convencionais em irradiações com doses elevadas, como as que queremos analisar.

Do que consta na literatura, e que seja do conhecimento da proponente, o único sistema de monitoração *on-line* de doses em processos de irradiação com elétrons baseia-se na detecção de fótons de *bremsstrahlung* produzidos pela incidência de elétrons na janela de um acelerador de 250 kV usado para esterilização de equipamentos médicos [36]. A medida da taxa de dose correspondente à detecção dos raios-X com espectro contínuo de energia não é direta e exige o emprego de dois detectores, um deles blindado para atuar como filtro dos fótons de menor energia. A corrente do acelerador é obtida mediante um cálculo que envolve a razão entre os sinais dos dois detectores, que permite determinar a tensão do acelerador, e a medida do sinal proveniente do detector sem blindagem que é proporcional a intensidade do feixe de fótons e, portanto ao produto da corrente pela tensão do acelerador. Para o tratamento dos dados foi desenvolvido um *software* específico dada a quantidade de informações registradas a cada 16 ms de exposição. Apesar da originalidade do sistema proposto, a sua utilização está limitada a doses inferiores a 60 kGy.

De uma forma geral, a dosimetria rotineira de processos de irradiação com elétrons em escala industrial, na faixa de dose de 10 a 300 kGy, baseia-se prioritariamente em dosímetros de triacetado de celulose (CTA), que apesar do baixo custo dos filmes, exige o emprego de espectrofotômetros especiais com lâmpadas de deutério para a leitura do parâmetro dosimétrico, a absorvância específica para o comprimento de onda de 280 nm. Além disto, uma desvantagem na dosimetria com filmes reside no fato que a dose registrada (com precisão máxima de 3%) corresponde a uma pequena porção do produto irradiado em um dado intervalo de tempo. Outra limitação é que a leitura do parâmetro dosimétrico, isto é, da medida da absorvância específica, só é possível após o término da irradiação, o que impossibilita eventuais correções das doses absorvidas pelos produtos durante o processo de irradiação. Adicionalmente, no caso de processadores com esteiras, a medida de dose por filmes exige que a velocidade da passagem do produto seja temporariamente reduzida para garantir que a dose absorvida pelo dosímetro esteja situada dentro dos seus limites operacionais.

Por estas razões, os dosímetros baseados em diodos de Si, que também desempenham a função de monitorar *on-line* a estabilidade do processo mediante a medida da corrente gerada pela radiação no volume sensível do dispositivo, são mais adequados que os sistemas dosimétricos estáticos com filmes. De fato, um sistema de monitoração em tempo real com a indicação e armazenamento contínuo de dose e tensão do acelerador, bem como a possibilidade de medida da dose total pela integração dos sinais de corrente registrados em função do tempo de irradiação, é o mais preciso e o que melhor atende as exigências de controle de qualidade das plantas de irradiação.

No caso de irradiação com feixes de elétrons obtidos em aceleradores, as pequenas variações de energia do feixe, com a conseqüente mudança na taxa de dose, são instantaneamente identificadas nos sinais de corrente, permitindo a correção do procedimento de forma a garantir o controle das doses máxima e mínima que podem ser ministradas aos produtos irradiados, segundo as normas de certificação dos processos de irradiação.

Neste contexto insere-se esta proposta de desenvolver dosímetros para altas doses de elétrons associada à continuidade das pesquisas em andamento relativas aos dosímetros para radiação gama.

Além do avanço tecnológico agregado à pesquisa proposta, a importância deste projeto reside na contribuição ao desenvolvimento de instrumentação na área de dosimetria de baixas e altas doses que permita aprimorar o controle de qualidade de procedimentos dosimétricos, uma vez que o LDPI do CTR atende às qualificações exigidas pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), pela utilização de técnicas submetidas ao Serviço Internacional de Garantia de Dose (IDAS).

Objetivos a serem alcançados

O presente projeto tem como objetivo principal:

- Desenvolvimento e calibração de um dosímetro semiconductor de baixo custo a ser utilizado pelo LDPI em medidas de doses de raios gama inferiores a 100 Gy e de dosímetro baseado em diodos de Si epitaxiais resistentes a danos de radiação para medidas de elevadas doses de elétrons, com monitoração em tempo real de taxas de dose presentes nas aplicações de Processamento por Radiação conduzidas no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP).

e como objetivos específicos:

- Determinação dos limites operacionais de dose, a reprodutibilidade e a estabilidade de resposta dos sistemas dosimétricos desenvolvidos.
- Simulação do campo de irradiação do irradiador gama Panorâmico instalado no CTR.

Metodologia a ser empregada

I. Dosímetro para Radiação Gama (doses até 100 Gy)

No desenvolvimento de sistemas destinados à dosimetria de radiação eletromagnética em processos de irradiação, a maior preocupação reside na detecção de fótons provenientes de fontes radioativas de ^{60}Co . A detecção destes fótons é feita através do registro do número de pulsos por unidade de tempo (regime de pulso) ou da medida do valor médio da corrente gerada no detector (regime de corrente). Em qualquer caso, para propósitos de dosimetria, é necessário relacionar a taxa de contagem ou a corrente medida com a taxa de dose da radiação gama no ar. Apesar dos processos físicos que determinam a detecção dos fótons nos dois regimes serem idênticos, para doses na faixa de 100 Gy, o regime de corrente é mais adequado devido à impossibilidade de se detectar pulsos individuais com sistemas eletrônicos convencionais.

O dosímetro proposto será construído a partir dos diodos comerciais de Si: SFH00206 (*Siemens*), S2506-4 e S3994-01 (*Hamamatsu*), operando em regime fotovoltaico, cujas características elétricas são adequadas para esta aplicação. A corrente gerada no diodo pela radiação gama do ^{60}Co será registrada em regime de fotocondutividade por um eletrômetro digital e armazenada durante todo o tempo de exposição.

A integração da curva da corrente em função do tempo de exposição permitirá a construção das curvas de calibração do dosímetro, ou seja, da carga média registrada em função da dose.

Inicialmente, em ausência de radiação, serão efetuadas as medidas das correntes de fuga do diodo com a finalidade de se definir o limite inferior de taxa de dose que poderá ser medida com o dosímetro. As irradiações serão feitas com um irradiador panorâmico de Cobalto-60, modelo FIS 60-04 n° 226 – fabricado pela *Yoshizawa Kiko Co, Ltd*. A fonte de irradiação é constituída por uma vareta de aço inoxidável com $20 \times 1 \text{ cm}^2$, preenchida com pastilhas de cobalto-60 e selada nas extremidades por solda. A fonte pode ser posicionada em diferentes alturas no eixo central, mas durante as calibrações e irradiações de rotina, esta fica posicionada 20 cm acima da mesa de irradiação. A configuração da fonte no centro da sala aumenta a capacidade volumétrica do irradiador com a irradiação simultânea de produtos de tamanhos e formatos variados além de aproveitar o espalhamento da radiação nas paredes da câmara. Neste tipo de irradiador a diminuição da taxa de dose é obtida através do aumento da distância em relação à fonte. No irradiador Panorâmico as taxas de dose podem variar desde 8,1 Gy/h até 125,0 Gy/h, determinadas em diferentes distâncias da fonte utilizando o dosímetro químico de Fricke.

Por razões de facilidade e portabilidade do sistema a ser desenvolvido, pretende-se utilizar como medidor de corrente um eletrômetro (Keithley 6517B) que permite armazenar medidas em intervalos de tempo pré-estabelecidos pelo operador. A transferência simultânea dos dados a um microcomputador, utilizando um programa em *LabView*, viabilizará a observação direta da corrente registrada em função do tempo durante a irradiação com a segurança exigida pelas normas de proteção radiológica. Além disto, esta informação permitirá a observação *on-line* da estabilidade do processo de irradiação, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado à taxa de dose, bem como a influência das taxas devidas ao deslocamento das fontes de ^{60}Co no início e no término do processo de irradiação.

De fato, em aplicações que envolvem doses totais inferiores a 10 Gy, é de fundamental importância a determinação da contribuição da dose gerada no deslocamento das fontes (dose de trânsito), o que só é possível com um sistema que permita medidas instantâneas de doses.

A sensibilidade do dosímetro será determinada mediante o registro das fotocorrentes geradas no dispositivo pela radiação gama do ^{60}Co em função das taxas de dose fornecidas pelo Irradiador Panorâmico. As características diferenciadas do campo de irradiação desta instalação serão consideradas para efeitos de simulação dos sinais de corrente gerados no diodo e futura comparação com os resultados experimentais. Este estudo de vertente teórica estará a cargo do Prof. Dr. Alessio Mangiarotti, do IFUSP, especialista em interação de radiação com a matéria, com quem colaboramos há mais de uma década, exigindo a introdução de fatores de correção para a não uniformidade de campo e de geometria relativa ao posicionamento do dispositivo nos diferentes campos de irradiação.

Adicionalmente, a medida da sensibilidade do dosímetro envolvendo elevadas taxas de dose permitirá verificar a presença de dano de radiação nos dispositivos estudados que, se existir, se traduzirá experimentalmente em uma redução da corrente medida para uma mesma taxa de dose. Estes resultados permitirão a definição da faixa de taxa de dose operacional do dosímetro.

Como a resposta de dispositivos semicondutores é dependente da temperatura, a calibração do sistema dosimétrico exigirá a monitoração da temperatura durante a irradiação para posterior normalização dos resultados obtidos para as doses absorvidas pelo produto irradiado.

Ainda serão temas de investigação neste projeto os limites operacionais de dose, a reprodutibilidade e a estabilidade de resposta do sistema dosimétrico a ser desenvolvido.

II. Dosímetro de Elétrons (doses de 10 a 300 kGy)

No tocante ao desenvolvimento dos dosímetros para elétrons provenientes do Acelerador tipo DC 1500/25/4–JOB 188 de 1,5 MV, disponível no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) do

IPEN-CNEN/SP, serão investigados os seguintes diodos: um comercial, S11141-10 (Hamamatsu) com 100 mm^2 de área e outro, de tipo p ou n com crescimento epitaxial (EPI), com área útil de 25 mm^2 , e estruturas obtidas mediante o depósito de uma camada epitaxial de $50 \text{ }\mu\text{m}$ ou $75 \text{ }\mu\text{m}$ de Si sobre um substrato de Si de $300 \text{ }\mu\text{m}$ de espessura crescido pelo método Czochralski(Cz). Estes dispositivos epitaxiais foram desenvolvidos no âmbito da colaboração RD-50 do Centro de Pesquisas Nucleares da Europa (CERN) e produzidos no Instituto de Física Experimental da Universidade de Hamburgo (Alemanha). As amostras que utilizaremos foram cedidas pela Dra. Iona Pintillie, do Instituto Nacional de Física de Materiais da Romênia, considerada uma das maiores especialistas em danos de radiação em semicondutores, membro da colaboração RD-50, que esteve em visita científica no IPEN com apoio financeiro do CNPq.

Uma parte importante nesta etapa do projeto será a da montagem da janela da sonda e a escolha dos materiais resistentes a danos de radiação para taxas de dose mais elevadas do que as encontradas no Irradiador Panorâmico.

Além disto, a nossa experiência prévia com dosímetros de radiação gama sugere que a melhor configuração da sonda consiste em conectar diretamente o diodo ao medidor de corrente mediante um cabo coaxial flexível. Com este procedimento espera-se evitar possíveis danos aos componentes eletrônicos do eletrômetro e garantir a mobilidade necessária para o posicionamento da sonda na esteira do dispositivo de irradiação.

Para simplificar o projeto da célula dosimétrica, os diodos comerciais e os fornecidos pela Dra. Ioana Pintilie serão empregados no modo fotovoltaico, visto que as suas propriedades elétricas, nomeadamente a corrente de fuga e a capacitância em função da tensão, já foram caracterizadas previamente em nosso grupo [41] e indicam a possibilidade de utilização destes dispositivos sem tensão de polarização reversa.

A célula dosimétrica para elétrons será construída de forma a garantir a menor distorção possível no campo de irradiação e também proteger o dispositivo de umidade, luz e vibrações mecânicas. Em ausência de radiação, serão efetuadas as medidas das correntes de fundo de todo o sistema para se definir o limite inferior de taxa de dose que poderá ser medida com o dosímetro.

As taxas de dose disponíveis no acelerador de elétrons situam-se no intervalo de $1,07 \text{ kGy/s}$ a $161,67 \text{ kGy/s}$ de forma que permitirão o registro das correntes com o eletrômetro Keithley 6517B em intervalos de tempo pré-estabelecidos pelo usuário. Novamente, a transferência simultânea dos dados a um microcomputador, utilizando um programa baseado na plataforma *Labview*, viabilizará a observação direta da corrente registrada em função do tempo durante a irradiação com a segurança exigida pelas normas de proteção radiológica. Além disto, esta informação permitirá a observação *on-line* da estabilidade do processo de irradiação, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado à taxa de dose. Com estas medidas será determinada a sensibilidade do dosímetro e

também a presença de dano de radiação que, se existir, se traduzirá experimentalmente em uma redução da corrente medida para uma mesma taxa de dose.

A integração das curvas das correntes registradas em função do tempo de exposição permitirá a construção das curvas de calibração do dosímetro, ou seja, da carga média registrada em função da dose. Espera-se obter uma resposta estável do sistema para doses inferiores a 300 kGy.

A reprodutibilidade dos dosímetros em função do tempo e da dose total acumulada também será estudada através da determinação do coeficiente de variação da corrente registrada para uma determinada taxa de dose. Este procedimento é necessário para garantir a qualidade dos processos de irradiação conduzidos no acelerador de elétrons e também permitir a definição da máxima dose suportável pelos diodos que ainda garanta as suas respostas dentro das condições impostas pelas normas de certificação dos procedimentos de irradiação.

Principais contribuições científicas ou tecnológicas da proposta

A proposta em tela tem como objetivo o desenvolvimento de sistemas dosimétricos para medidas instantâneas de dose de radiação gama e de elétrons em aplicações de processamento por radiação.

Os sistemas dosimétricos a serem desenvolvidos deverão contribuir para melhorar o controle de qualidade de procedimentos de dosimetria no LDPI, uma vez que este laboratório atende as qualificações exigidas pela Agência Internacional de Energia Atômica, pela utilização de técnicas submetidas ao Serviço Internacional de Garantia de Dose (IDAS).

Finalmente, vale ressaltar que até o presente não existem sistemas comerciais que permitam medidas instantâneas de doses de raios gama até 100 Gy, e, portanto, a possibilidade de desenvolvimento de um dosímetro baseado em diodos de Si de custo acessível e com grande oferta no mercado nacional representa uma contribuição importante para a instrumentação nuclear nesta área. Da mesma forma, com relação à dosimetria de altas doses de elétrons, não há sistemas comerciais para medidas *on-line* utilizando diodos de Si para a detecção direta destas radiações, dado o elevado dano de radiação sofrido pelo semicondutor crescido pelas técnicas convencionais.

Os resultados obtidos serão englobados em produção científica decorrente de publicações em revistas científicas internacionais indexadas (Qualis A), com participação em Congressos Nacionais e Internacionais da área.

Orçamento Detalhado

I. Custeio

▪ **Material de Consumo Nacional:**

- **diodos de Si:** SFH00206 (Siemens) e equivalentes. Valor: R\$ 1.000,00
- **material para construção das sondas dosimétricas,** placas de PMMA, mylar aluminizado. Valor: R\$ 3.000,00
- **material para irradiações:** suportes para irradiação gama e com elétrons. Valor: R\$ 1.000,00

- **Software Labview, versão Base, com 5 anos de atualizações :** software necessário para o controle automatizado do eletrômetro durante as irradiações. O fabricante já disponibiliza driver de controle para este software. Valor: R\$ 2.000,00

▪ **Material de Consumo Importado (US\$ 1.00 = R\$ 3,30):**

- **material para construção das sondas dosimétricas:**
 - a) diodos S2506-4, S3994-01 e S11141-10. Valor: R\$ 10.000,00
 - b) conectores Lemo, adaptadores Lemo-BNC, adaptador triaxial-BNC. Valor: R\$ 5.500,00
- **acessório para equipamento:**
 - a) placa 8010-DTB da Keithley para teste de caracterização elétrica de diodos com o eletrômetro Keithley 6517B. Valor R\$ 2.200,00
- **material para irradiações:**
 - a) 40 adesivos indicadores de temperatura irreversível (27° a 65°), marca GEX, modelo P8003. Valor: R\$ 600,00
 - b) 2 cabos coaxiais de baixo ruído com conectores BNC de 20m de comprimento (para conexão das sondas dosimétricas ao eletrômetro). Valor: R\$ 6.000,00
 - c) 1 cabo triaxial de baixo ruído com conectores BNC-TRIAx de 20m de comprimento (para conexão das sondas dosimétricas ao eletrômetro). Valor: R\$ 3.300,00
- **Despesas de importação:** Valor: R\$ 2.760,00

- **Taxas de Inscrição em Congressos Internacionais (US\$ 1.00 = R\$ 3,30):**
 - participação em dois dos eventos abaixo discriminados durante a execução do projeto. Valor: R\$ 6.600,00
 - a) 19th International Meeting on Radiation Processing (IMRP)
 - b) 19th International Solid State Dosimetry Conference (SSD 19)

c) 3rd International Conference on Dosimetry and its Applications (ICDA-3)
d) 2018 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS-IEEE)

▪ **Serviços:**

a) confecção das sondas dosimétricas e suportes de irradiação.

Valor: R\$ 4.000,00

b) confecção de microsolda e encapsulamento dos diodos epitaxiais no CTI/Campinas

Valor: R\$ 3.000,00

Total parcial Custeio: R\$ 50.960,00

II. Capital

▪ **Equipamentos adquiridos no País**

1. **Notebook**, marca Dell modelo Inspiron 5000 (7ª geração do Processador Intel® Core™ i7-7200U (2 núcleos, 2.7 GHz expansível até 3.5 GHz, Cache de 4 M) com 1 ano de garantia no local e pacote Office: necessário para aquisição e análise dos dados.

Valor: R\$ 3.850,00

2. **No-break**, marca APC modelo BZ2200 de 2200VA ou equivalente: necessário para manter o sistema de aquisição de dados operando em caso de falta repentina de energia.

Valor: R\$ 1.650,00

3. **Temporizador**, marca Contemp, modelo T307 (3 unidades): dispositivo microcontrolado com display dedicado de seis dígitos e tecla de função dedicado ao operador, calibrado por rastreamento (0,01 s a 99 h). Serão utilizados para controle de duração das irradiações no acelerador de elétrons, na fonte panorâmica e Gammacell.

Valor unitário: R\$ 600,00 - Valor Total: R\$ 1.800,00.

Total parcial de Capital: R\$ 7.300,00

Total Geral do Projeto: R\$ 58.260,00

Cronograma de Execução

Etapa	1º	2º	3º	4º
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterização Elétrica dos dispositivos; ▪ Projeto e Construção das Sondas Dosimétricas para Raios Gama e Elétrons; ▪ Definição dos parâmetros de irradiação na fonte panorâmica e no acelerador de elétrons; ▪ Teste do medidor de corrente, sistema de aquisição e registro dos dados. Medidas das correntes de fuga dos diodos nas montagens onde serão realizadas as irradiações. 	x	x		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinação dos coeficientes de variação (CV) dos sinais de corrente registrados para uma determinada taxa de dose; ▪ Medidas de sensibilidade e curva resposta com a dose para as diodos. 		x	x	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verificação da estabilidade e reprodutibilidade de resposta dos diodos para as doses máximas pretendidas. 		x	x	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medida da distribuição do campo de radiação para o irradiador panorâmico e comparação com os dados da simulação; ▪ Medida da influência da dose devida ao deslocamento das fontes de Cobalto para este irradiador gama. 		x	x	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medidas das doses totais e testes de reprodutibilidade dos dosímetros. 			x	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinação das curvas resposta e calibração dos diodos para aplicações rotineiras em dosimetria de altas doses. 			x	x
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análise final dos resultados. Elaboração de relatório final. 			x	x

Demais participantes do projeto

1. IPEN-CNEN/SP

- **Dr^a Carmen Cecília Bueno** – Pesquisadora Titular IPEN-CNEN/SP: participará das irradiações e análise de resultados.
- **MSc. Célia Marina Napolitano** – Tecnologista Senior IPEN-CNEN/SP: responsável pelo LDPI, auxiliará nos procedimentos de calibração das sondas dosimétricas.
- **Eng. Elisabeth Somessari** – Tecnologista Senior IPEN-CNEN/SP: responsável pela operação dos irradiadores gama e de elétrons do CTR.
- **MSc. Samir Somessari** – Tecnologista Senior IPEN-CNEN/SP: responsável pela operação dos irradiadores gama e de elétrons do CTR.
- **Dr^a Anna Raquel Petri** – Pós-Doc IPEN-CNEN/SP: participará das irradiações e análise de resultados.

2. Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP)

- **Prof. Dr. Alessio Mangiarotti** – será responsável pelas simulações por Monte Carlo do irradiador panorâmico e da resposta das sondas dosimétricas.

Colaborações estabelecidas com outros centros de pesquisa na área

1. Departamento de Física Experimental – Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP).

Mantemos profícua colaboração desde 1990 com o IFUSP e para este projeto, em particular, contaremos com a valiosa colaboração do Prof. Dr. Alessio Mangiarotti para as simulações de interação de radiação com a matéria usando códigos de Monte Carlo.

2. Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes/DEN – UFPE

Colaboração estabelecida há mais de dez anos, envolvendo desenvolvimento e testes de dosímetros baseados no uso de Diodos de Si.

Disponibilidade efetiva de infra-estrutura e de apoio técnico para o desenvolvimento do projeto

Como temos pesquisado na área de desenvolvimento e caracterização de detectores de radiação gasosos e semicondutores, dispomos de eletrômetros, osciloscópios, multímetros, *source-meter*, geradores de função, bem como de eletrônica nuclear convencional (bastidores NIM-BIN, geradores de pulso, fontes de tensão, pré-amplificadores de carga e de tensão, amplificadores, analisadores monocanal, discriminadores de fração constante, *scalers*) necessários para a aquisição e análise dos sinais. Para o processo de limpeza dos materiais de construção dos detectores também dispomos de sistemas de ultra-som e estufa. Esta infra-estrutura foi obtida através dos auxílios CNPq e FAPESP concedidos ao grupo nos últimos anos.

Além disso, contamos também com toda a infra-estrutura disponível no CTR e no IPEN-CNEN/SP.

Referências Bibliográficas

- [1] BEERS, E.W. (1990). **Innovations in irradiator design** *Radiat. Phys. Chem.*, V.35, p.539-546, 1990.
- [2] CLOUGH, R. and SHALABY, S. Eds. (1990). **Irradiation of Polymers, Fundamental and Technological Applications**. ACS Symposium Series 620 (Oxford University Press, Oxford,UK).
- [3] DORDA E. M. **Dose control in the semi-industrial irradiation plant at Ezeiza Atomic Center**. *Appl. Radiat. Isot.* V.40,p.1009-1012,1989.
- [4] CURZIO,O.A. and CROCI, C.A. **A ⁶⁰Co multipurpose radiation processing facility at Bahia Blanca, Argentina**. *Radiat. Phys. Chem.*, 35, 590-594, 1990.
- [5] FIELDEN E. M.; HOLM N. W.. **Manual on Radiation Dosimetry.Cap. 10, Dosimetry in accelerator research and processing**. Holm N. W; Berry R. J. Marcel Dekker, New York.
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION / AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Calculating Absorbed Dose From Gamma or X Radiation**. 1997. (ISO/ASTM: E 666 - 97).
- [7] INTERNATIONAL COMMISSION IN RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Dosimetry Systems for Use in Radiation Processing**. 2008. (ICRU Report 80).
- [8] BOAG J. W.; DOLPHIN G. W., ROTBLAT J. **Radiation dosimetry by transparent plastics**, *Radiat. Res.*, V.9,p.589-610, 1958.
- [9] BERRY R. J.;ORTON C. G. **Reference Perspex radiation dosimeter**, *Phys. Med. Biol.*, V.11, p.475-476, 1966.
- [10] BERRY R. J.; MARSHALL C. H. **Clear perspex H.X. as a reference dosimeter for electron and gamma radiation**, *Phys. Med. Biol.*,V.14, p.585-596, 1969.
- [11] CHADWICK K. H.; LEENHOUTS H. P. **Fading of radiation induced optical density in polymethylmethacrylate on oxygen diffusion**. *Phys. Med. Biol.*,V.15,p.743-744,1970.
- [12] BARRETT J. H.; SHARPE P. H. G. , STUART I. P. **An investigation, Over the Range of Conditions Occurring in Radiation Processing Plants, of the Performance of Routine Dosimeters of the Type Basedon Polymethyl Methacrylate, Part 1**. *NPL Report RS 49*,1980.
- [13] BARRETT J. H.; SHARPE P. H. G. , STUART I. P. **An investigation, Over the Range of Conditions Occurring in Radiation Processing Plants, of the Performance of Routine Dosimeters of the Type Basedon Polymethyl Methacrylate, Part 2**. *NPL Report RS 52*,1981.
- [14] MATSUDA K.; NAGAI S. **Studies on the radiation-induced coloration mechanism of the cellulose triacetate film dosimeter.**, *J. Radiat. Appli. Instrum.*, V.A42,p.1215-1221, 1991.
- [15] BARRETT J. H. ;MCLAUGHLIN W. L. **Dosimetry with dyed and undyed acrylic plastic**. *J. Appl. Radiat. Isot.*, V. 33, p.1177-1187, 1982.

- [16] MCLAUGHLIN W. L.; MILLER A., ABDEL-RAHIM F., PRESINGER T. **Plastic film materials for dosimetry of very large absorbed doses.**, *Radiat. Phys. Chem.*, V.25,p.729-748, 1985.
- [17] MILLER A.; HARGITAI P., KOVÁCS A. **A PC based thin film dosimeter system.**, *Radiat. Phys. Chem.*, V.57, 679-685, 2000.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION / AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Application of Thermoluminescence-Dosimetry (TLD) Systems for Determining Absorbed Dose in Radiation-Hardness Testing of Electronic Devices.** 1997. (ISO/ASTM : E668 - 97).
- [19] CHADWICK K. H. **The effect of humidity on the response of HX `Perspex` dosimeters.** in: **RESEARCH IN RADIATION PROCESSING DOSIMETRY**, November 8-11, 1983, Munich. *Proceeding of Research Co-ordination meeting*, Vienna: IAEA-TECDOC-321, 1983.
- [20] GLOVER K. M.; PLESTED M. E., WATTS M. F., WHITTAKER B. **A study of some parameters relevant to the response of harwell PMMA dosimeters to gamma and electron irradiation.**, *Radiat. Phys. Chem.*, V.42p.739-742, 1993.
- [21] LIKHACHEV, V. P. ; DIAS, J. F. ; YONEAMA, M. L. ; MARTINS, M. N. ; ARRUDA-NETO, J. D. T. ; Bueno C. C. ; PERVERTAILO, V. ; FROLOV, O. . **Silicon Strip Detectors for Fission.** *Nucl. Instrum. Methods Phys.*, v. A376, p. 455-461, 1996.
- [22] BUENO C. C. ; GONÇALVES, J. A. C. ; SANTOS, M. D. S. **The performance of low-cost commercial photodiodes for charged particle and X-ray spectrometry.** . *Nucl. Instrum. Methods Phys.* v. A371, p. 460-464, 1996.
- [23] LIKHACHEV, V. P. ; MARTINS, M. N. ; ARRUDA-NETO, J. D. T. ; Bueno C. C. ; SANTOS, M. D. S. ; EVSEEV, I. G. ; GONÇALVES, J. A. C. ; HELENE, O. A. M. ; PASCHUK, S. A. ; SCHELIN, H. R. . **Geometrical parameters of a detection system: a Monte Carlo approach.** . *Nucl. Instrum. Methods Phys.* v. A390, p. 251-256, 1997.
- [24] CORREA, A. A. S. ; Bueno C. C. ; GONÇALVES, J. A. C. ; MENDES, P. F. P. R. ; SOUZA, J. P. ; PINTO, J. K. C. **Manufactured Silicon Diode used as an Internal Conversion Electrons Detector.** *Brazilian Journal of Physics*, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 973-975, 2004.
- [25] CAMARGO, F. ; Bueno C. C. ; GONÇALVES, J. A. C. ; MENDES, P. F. P. R. ; SOUZA, J. P. ; PINTO, J. K. C. . **On the Origin of the Satellite Peaks in Alpha Particle Spectra.** *Brazilian J. of Phys.* , São Paulo, v. 34, n. 3, p. 936-938, 2004.
- [26] BUENO C. C. ; GONÇALVES, J. A. C. ; MAGALHÃES, R. R. ; SANTOS, M. D. S. **Response of PIN diodes as room temperature photon detectors.** *App. Rad. and Isot.*, v. 61, n. 6, p. 1343-1347, 2004.
- [27] CAMARGO, F. **Fatores que influenciam a resolução em energia na espectrometria de partículas alfa com diodos de Si.** 2005. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.
- [28] CAMARGO, F. ; KHOURI, H. J. ; NASCIMENTO, C. R. ; ASFORA, V. K. ; Bueno C. C. **Evaluation of a multi-guard ring structure (MGR) diode as diagnostic X-ray dosimeter.** *Nucl. Instrum. Methods Phys.* v. 580, p. 194-196, 2007.

- [29] GONÇALVES, J. A. C. ; CAMARGO, F. ; FRAGA, M. M. ; PINTO, J. K. C. ; BUENO C. C. **Rad-Hard Silicon Diode Response for Photon Spectrometry. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*** , v. 54, p. 276-279, 2007.
- [30] BUENO C. C. ; CAMARGO, F. ; GONÇALVES, J. A. C. ; NAPOLITANO, C. M. ; HARKOENEN, J. **MCz diode response as a high-dose gamma radiation dosimeter. *Rad. Meas.***, v. 43, p. 1160-1162, 2008.
- [31] LINDSTROM, G., FRETWURST, E., HONNIGER, F., KRAMBERGER, G., MOLLER-IVENS, M., PINTILIE, I., SCHRAMM, A. **Radiation tolerance of epitaxial silicon detectors at very large proton fluencies. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.*** v. 556, p. 451-458, 2006.
- [32] KHOMENKOVA, V., BISELLOA, D., BRUZZI, M., CANDELORIA, A., LITOVCHENKOVA, A., PIEMONTE, C., RANDO, R., RAVOTTI, F., ZORZI, N. **Irradiation effects on thin epitaxial silicon detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.*** v. 568, p. 61-65, 2006.
- [33] CREANZA, D., BASSIGNANA, D., BORRELLO, L., BOSCARDIN, M., BRUZZI, M., PALMA, M. DE, FOCARDI, E., MACCHIOLO, A., MANNA, N., MENICHELLI, D., MESSINEO, A., PIEMONTE, C., POZZA, A., RADICCI, V., SCARINGELLA, M., ZORZI, N. **Comparison of the radiation hardness of Magnetic Czochralski and Epitaxial silicon substrates after 26MeV proton and reactor neutron irradiation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.*** v. 579, p. 608-613, 2007.
- [34] FRETWURST, E., HONNIGER, F., KRAMBERGER, G., LINDSTROM, G., PINTILIE, I., RÖDER, R. **Radiation damage studies on MCz and standard and oxygen enriched epitaxial silicon devices. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.*** v. 583, p. 58-63, 2007.
- [35] BRUZZI, M., BUCCIOLINI, M., CASATI, M., MENICHELLI, D., TALAMONTI, C., PIEMONTE, C., SVENSSON, B. G. **Epitaxial silicon devices for dosimetry applications. *Appl. Phys. Letters***, v. 90, p. 172109/1-171109-3, 2007.
- [36] EELAND, D.R.; NABLO, S.V.; WEISS, D.E.; SINZ, T.E. **Industrial use of the real time monitor for quality assurance in electron processing. *Radiat. Phys. Chem.*** v. 55, p. 429-436, 1999.



TERMO DE ACEITAÇÃO

O Projeto de Pesquisa Tecnológica intitulado: “**Dosímetros Semicondutores aplicados em Processamento de Materiais por Radiação Gama e Elétrons**”, coordenado pela Dra. Josemary A. C. Gonçalves, é de grande interesse para as atividades relativas a processamento por radiação desenvolvidas no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR), principalmente em relação à dosimetria gama até 100 Gy e de elétrons de altas doses (300 kGy). Trata-se de atividade vinculada à área de conhecimento inserida no planejamento estratégico do IPEN, de acordo com seu Plano de Ação/2016 – Programa 2/Atividade 240.

O desenvolvimento deste projeto permitirá dotar o Laboratório de Dosimetria de Processos Industriais (LDPI) do CTR de sistemas dosimétricos para medidas em tempo real de doses de radiação gama até 100 Gy e altas doses de elétrons, contribuindo de forma significativa para o aprimoramento do controle de qualidade dos procedimentos dosimétricos realizados pelo LDPI.

No aspecto de apoio técnico para seu desenvolvimento, o presente projeto contará com toda infraestrutura do CTR, pois se trata de uma das linhas de pesquisa prioritárias para as atividades deste Centro. Com relação à equipe que integra o projeto, todos declaram ter conhecimento e concordar com as atividades que lhes foram atribuídas no mesmo, conforme abaixo assinado.

Atenciosamente,

Dr^a Margarida Mizue Hamada

Gerente

Centro de Tecnologia das Radiações – CTR
IPEN/CNEN – SP

Dr^a Carmen Cecília Bueno

Pesquisadora Titular - CTR

Eng. Elizabeth Sebastiana Ribeiro Somessari

Tecnologista Senior - CTR

MSc. Celia Marina Napolitano

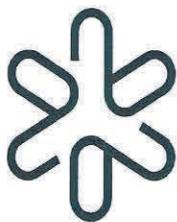
Tecnologista Senior - CTR

MSc. Samir Luiz Somessari

Tecnologista Senior - CTR

Dr^a Anna Raquel Petri

Bolsista Pós-Doc - CTR



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA EXPERIMENTAL
Rua do Matão, 1371 - 05508-090 - São Paulo, SP
Telefone (11) 3091-6934
e-mail: alessio@if.usp.br



Declaração de Anuência

Eu, **Alessio Mangiarotti**, CPF nº 236.689.798.71, Prof. Dr. do Departamento de Física Experimental do Instituto de Física da USP, declaro minha concordância em participar, como membro da equipe, do projeto de pesquisa tecnológica intitulado "**Dosímetros Semicondutores aplicados em Processamento de Materiais por Radiação Gama e Elétrons**", coordenado pela **Dr^a. Josemary A. C. Gonçalves** do IPEN-CNEN/SP, a ser submetido ao **EDITAL INTERNO Oportunidade de Nucleação de novos Projetos de Pesquisa – DPDE/IPEN Nº4/2017**. Outrossim, atesto conhecimento e concordância das atividades que me foram atribuídas no projeto.

São Paulo, 23 de Maio de 2017.

Prof. Dr. Alessio Mangiarotti