

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA

GABRIELA DE OLIVEIRA MOTTA

**CONFORMIDADE ÀS DIRETRIZES DE
RADIOPROTEÇÃO:
APLICAÇÃO EM LABORATÓRIOS DE ENSINO E
PESQUISA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

BRASÍLIA

21 DE FEVEREIRO DE 2025

Gabriela de Oliveira Motta

**CONFORMIDADE ÀS DIRETRIZES DE
RADIOPROTEÇÃO:
Aplicação em Laboratórios de Ensino e Pesquisa da
Universidade de Brasília**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharelado em Física.

Orientador: Antonio Carlos Pedroza

Coorientador: Araken dos Santos Werneck Rodrigues

Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Física

Brasília

21 de fevereiro de 2025

Resumo

Este estudo reflete sobre a adesão dos laboratórios de pesquisa da Universidade de Brasília às diretrizes nacionais de proteção radiológica estabelecidas pela CNEN. O estudo teve propósito inicial de analisar laboratórios do Instituto de Física, mas estendeu-se a outras unidades acadêmicas. Ao utilizar uma combinação de revisão da literatura, entrevistas com os responsáveis dos laboratórios e a realização de um estudo radiométrico, teve-se como objetivo primário avaliar a eficácia de aplicação das medidas de proteção radiológica. Buscou-se entender o caminho burocrático submetido ao se tratar da aquisição, manipulação e descomissionamento de fontes, bem como o preparo da universidade ao se tratar destes tipos de compostos. Além disso, encontrou-se no escopo dos objetivos verificar os níveis de exposição à radiação e propor melhorias de acordo com as diretrizes nacionais existentes. Das expectativas para o estudo, encontram-se não apenas procurar melhorar a segurança e bem-estar dos indivíduos que estão em constante contato com a radiação, mas também instigar uma reflexão sobre o cumprimento de protocolos de proteção radiológica em ambientes acadêmicos, independente de resultados tidos como positivos.

Palavras-chaves: Proteção Radiológica. Radiação Ionizante. Segurança Pública. Segurança do Trabalho. Resíduos Radioativos. Laboratórios de Pesquisa. Exposição Ocupacional.

Este trabalho é dedicado a todos os trabalhadores que sofreram efeitos adversos da radiação e que contribuíram para a evolução de pesquisa na sociedade.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha Fé, que me guia e é fonte de força ao longo de minha jornada acadêmica. À minha família, pelo apoio incondicional e incentivo constante, e aos amigos e colegas, pelo companheirismo e troca de conhecimento.

Aos meus orientadores, Dr. Antonio Carlos Pedroza e Dr. Araken Werneck, expresso minha profunda gratidão pela orientação, paciência e incentivo à busca pela excelência.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte deste percurso, meu sinceros agradecimentos.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem em placa fotográfica de uma mão com anel, diretamente de seu report 'ON A NEW KIND OF RAYS'	28
Figura 2 – Comportamento de atenuação de diferentes meios de interação com a matéria perante a energia da radiação	33
Figura 3 – Probabilidade da ocorrência dos principais processos de interação com a matéria. A linha preta contínua presente no gráfico sinaliza onde a probabilidade de acontecimento dentre os efeitos é virtualmente igual	34
Figura 4 – Representação visual do Efeito Compton	35
Figura 5 – Relação de transferência de energia de fóton incidente e fóton espalhado perante ao ângulo de espalhamento Compton	36
Figura 6 – Esquemática de referência para interações coulombianas e seus parâmetros colisionais, com "a" sendo o raio do átomo clássico e "b" o parâmetro de impacto	39
Figura 7 – Número de Ionizações Coletadas a depender da voltagem - Regiões de funcionamento de detectores gasosos	43
Figura 8 – Etapas de efeitos de interação da radiação com sistemas biológicos	47
Figura 9 – Esquemática de representação de efeitos gerados por radiações de LET alto e baixo	48
Figura 10 – Comportamento de taxas de sobrevivência celular em mamíferos, em função da dose para radiações de alto e baixo LET	49
Figura 11 – Eficácia Biológica Relativa em função da LET, considerando ainda a taxa de sobrevivência celular	51
Figura 12 – Esquemática de ação direta e indireta da radiação no DNA	52
Figura 13 – Esquemática de ciclo celular e seus checkpoints	54
Figura 14 – Trilha celular após dano ao DNA, a depender da forma de reparo	56
Figura 15 – Curva de efeitos estocásticos, à esquerda, vs curva de efeitos determinísticos, à direita	58
Figura 16 – Modelo de extrapolação de baixas doses e a região de dose de maior concentração de dados epidemiológicos	60
Figura 17 – Unidades Móveis de Tratamento com Raios-X durante a Primeira Guerra	62
Figura 18 – Exemplo de aplicação do princípio ALARA, As Low As Reasonably Achievable	66
Figura 19 – Exemplo de penetração de radiação perante à tipos de blindagem	72

Figura 20 – Organograma condensado aos órgãos e departamentos de interesse. O caminho delimitado na cor vermelha ilustra a trajetória de pesquisa idealizada para este estudo.	87
Figura 21 – Exemplo de Mapa de Riscos instaurados pela CEST em diversos laboratórios do campus	89
Figura 22 – Equipamento Xeuss 2.0 do Laboratório de Fluidos Complexos, IF (Imagem Ilustrativa)	95
Figura 23 – Equipamento Empyrean do Laboratório de LDRX-IF (Imagem Ilustrativa)	96
Figura 24 – Armazenamento das Fontes do Laboratório de Ensino, Módulo 9 - IF .	100
Figura 25 – Imagens do setup montado para aferição das taxas de dose do local . .	102

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fatores Peso para cada tipo de radiação. Foram omitidos os valores referentes ao nêutrons.	67
Tabela 2 – Fatores Peso para cada órgão/tecido, normalizados.	69
Tabela 3 – Categorização de Fontes Radioativas perante a Razão de suas Atividades ^{a)}	76
Tabela 4 – Limites superiores de dose anuais exigidos perante a NN 3.01 p18 . . .	77
Tabela 5 – Locais e Responsáveis identificados que possuem/fazem o uso de fontes de radiação.	92
Tabela 6 – Locais, respectivas fontes utilizadas e informações adicionais documentadas.	93
Tabela 7 – Locais Identificados com Fontes Geradoras de Radiação Ionizante . . .	94
Tabela 8 – Levantamento atualizado das fontes referentes ao Laboratório de Ensino do Instituto de Física, Módulo 9	99
Tabela 9 – Atividades atuais das fontes comparadas aos seus critérios de isenção propostos pela NN 3.01. A atividade total se refere à somatória das atividades individuais das fontes guardadas em conjunto. (CNEN, 2024a)	100
Tabela 10 – Média de Taxa de Dose e extrapolações para cargas horárias de 30 horas semanais, 8 horas semanais e 1 ano	103

Lista de abreviaturas e siglas

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
IF	Instituto de Física
UnB	Universidade de Brasília
ICRP	International Commission of Radiological Protection
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
IAEA	International Atomic Energy Agency
IOE	Indivíduos Ocupacionalmente Expostos
EPI	Equipamento de Proteção Individual
PPR	Plano de Proteção Radiológica
CPRP	Comissão Permanente de Radioproteção
SeMa	Secretaria do Meio Ambiente
CEST	Coordenadoria de Engenharia e Segurança do Trabalho
DQSVT	Diretoria de Saúde, Segurança e Qualidade de Vida no Trabalho
DGP	Decanato de Gestão de Pessoas
SI	Sistema Internacional

Lista de símbolos

${}^0_0\gamma$	Emissão tipo Gama
${}^4_2\alpha$	Emissão tipo Alfa
${}^0_{-1}\beta$	Emissão tipo Beta-
${}^0_1\beta$	Emissão tipo Beta+

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	O Problema	18
1.2	Objetivos	20
2	METODOLOGIA	21
2.1	A Revisão Bibliográfica	21
2.2	Levantamento de Locais e Localização de Responsáveis	22
2.3	As Entrevistas	22
2.4	O Estudo de Observação Radiométrica	24
2.5	População da Pesquisa	24
2.6	A Análise	25
2.7	Considerações	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	A Radiação	27
3.1.1	Uma perspectiva histórica	27
3.1.2	A Radiação Ionizante e Não Ionizante	29
3.1.3	Radiação Indireta e Diretamente Ionizante e seus Mecanismos de Emissão	30
3.1.4	A Radiação Eletromagnética sua Interação com a Matéria	33
3.1.5	Radiação Diretamente Ionizante e sua Interação com a Matéria	38
3.2	Detectores	41
3.2.1	Detecção por Emulsões Fotográficas	41
3.2.2	Detectores Termoluminescentes (TLDs)	42
3.2.3	Detectores a Gás	42
3.2.4	Detectores por Cintilação	45
3.3	Radiobiologia e Efeitos Biológicos da Radiação	46
3.3.1	Transferência de Energia Linear (LET)	47
3.3.2	Eficiência Biológica Relativa (RBE)	50
3.3.3	Efeitos da Radiação: Uma Perspectiva Molecular	52
3.3.4	Efeitos da Radiação: Uma Perspectiva Celular	53
3.3.5	Efeitos Determinísticos e Efeitos Estocásticos	57
3.3.6	Efeitos de Radiação de Baixas Doses	59
3.3.7	A Radiobiologia no Contexto da Radioproteção	60
3.4	A Origem das Diretrizes Internacionais	61
3.5	As Organizações Internacionais e suas Principais Publicações	63
3.6	A CNEN	65

3.7	Conceitos Básicos de Radioproteção	65
3.7.1	Os Pilares da Proteção Radiológica	65
3.7.2	Algumas Grandezas Radiológicas	66
3.7.3	As Grandezas Operacionais	70
3.7.4	A Blindagem	71
3.8	Normas Nacionais de Proteção Radiológica	73
3.8.1	NN 3.01 - Requisitos Básicos de Radioproteção E Segurança Radiológica de Fontes Radioativas	73
3.8.2	NN 7.01 Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica	79
3.8.3	NN 6.02 - Licenciamento de Instalações Radiativas	79
3.8.4	A Isenção e Dispensa	82
4	DISCUSSÕES E RESULTADOS	85
4.1	Sobre a existência de um Plano de Radioproteção da Universidade	85
4.2	Dos Órgãos Administrativos Responsáveis: UnB	86
4.2.1	A Coordenadoria de Engenharia e Segurança do Trabalho	87
4.2.2	A Secretaria do Meio Ambiente da UnB - SeMa	89
4.2.3	A Comissão Permanente de Radioproteção - CPRP	91
4.3	Locais Portadores de Radioisótopos	92
4.4	Locais Portadores de Geradores de Radiação	93
4.5	O Instituto de Física	95
4.5.1	Sobre o Plano de Proteção Radiológica do Mössbauer	97
4.5.2	Sobre o Laboratório de Ensino e seu Levantamento Radiométrico	99
4.6	Sobre os Isótopos em Outros Departamentos	104
4.6.1	Instituto de Geologia	104
4.6.2	Instituto de Química	105
4.6.3	Departamento de Ciências Fisiológicas	106
4.7	Sugestões e Próximos Passos	107
5	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS	111

1 Introdução

A radiação ionizante tem um papel essencial em várias áreas da sociedade, representando aplicações que seguem muito além da área médica. Dentre as principais aplicações possíveis, são encontradas a pesquisa em física nuclear, biologia molecular, geologia, medicina, entre outras áreas de investigação científica e tecnológica. É fundamental, entretanto, compreender que a utilização de fontes de radiação ionizante pode ocasionar riscos significativos não apenas para os trabalhadores diretamente expostos, mas também para o público geral e o meio ambiente. Ao possuir e utilizar este tipo de fonte, idealmente, deve-se cumprir rigorosos processos regulamentares para assegurar a permanência em ambientes controlados - com a mínima probabilidade de contato não autorizado - uso com a devida blindagem, conforme o tipo de radiação emitida.

A proteção radiológica constitui um pilar essencial no manejo de radiações ionizantes, abrangendo aplicações em áreas diversas como a medicina, a indústria e a pesquisa científica. Desde a descoberta dos raios X por Wilhelm Röntgen, em 1895, e da radioatividade por Henri Becquerel, em 1896, os avanços científicos trouxeram benefícios inquestionáveis para a humanidade, mas também revelaram os potenciais danos à saúde associados à exposição inadequada à radiação. Casos documentados de lesões cutâneas e doenças relacionadas à radiação nos primeiros anos de exploração dos raios X demonstraram a urgência de desenvolver diretrizes para proteger tanto os trabalhadores quanto o público em geral.

Os usuários que manipulam diretamente as fontes de radiação, bem como os indivíduos do público que possam transitar em áreas adjacentes, tem sua segurança fundamentada por este princípio até os dias atuais. Este conceito, apesar de amplo, é baseado em um conjunto de normas sempre com a mesma finalidade: minimizar a exposição à radiação ionizante, otimizar a segurança e justificar o uso da radiação.

No Brasil, o principal órgão regulamentador de tecnologias associadas ao uso nuclear é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Esta comissão estabelece normas direcionadas de acordo com o tipo de instituição, finalidade e uso das fontes de radiação. Além disso, a CNEN é responsável pela autorização de venda, licenciamento e fiscalização dos locais que detêm tais fontes.

Fundamentadas em diretrizes internacionais, as normas estabelecidas pela CNEN usam como base, científica e técnica, publicações como as da International Commission of Radiological Protection (ICRP), e são complementadas por relatórios individuais como os produzidos pelo NCRP - o National Council on Radiation Protection and Measurements. Juntamente a estas instituições se encontra também a International Atomic Energy

Agency (IAEA), que segue a proposta de promover um uso pacífico de energia nuclear e, ao mesmo tempo, monitorar a aplicação das normas definidas internacionalmente.

As publicações emitidas por essas comissões apresentam uma otimização baseada em anos de observação de efeitos biológicos da radiação, crescendo significativamente em quantidade de registros após a Segunda Guerra Mundial ([WOJCIK; HARMS-RINGDAHL, 2019](#)).

As normas nacionais, portanto, apesar de, por vezes, ter de se adaptar ao proposto pelo sistema legislativo brasileiro, possui grandes semelhanças com o proposto internacionalmente, garantindo práticas alinhadas ao padrão global ([NCRP, 2006](#); [ICRP, 2007](#); [CLEMENT; PROTECTION, 2012](#)).

1.1 O Problema

O descontrole tido sobre a exposição do público e trabalhadores a dados tipos de radiação põe em perigo não só o local de trabalho mas também a segurança pública em seu todo. A radiação ionizante, com sua capacidade de causar danos consideráveis às fitas de DNA e a outros componentes celulares, gera uma variedade de efeitos biológicos, estes que podem variar dependendo da dose e da duração da exposição ([HALPERIN et al., 2019](#), p. 115-120, 290).

A falta de controle sobre os níveis de radiação pode resultar em problemas graves, como a Síndrome Aguda da Radiação (SAR) e queimaduras induzidas. Além disso, torna-se cada vez mais comum dentre profissionais expostos a altas doses diariamente problemas na visão, isto, devido a alta radiosensibilidade do cristalino ([HAMADA; AZIZOVA; LITTLE, 2020](#)). Outro âmbito também não comumente considerado é o impacto psicológico no indivíduo, uma vez que uma exposição não consentida ou planejada à radiação pode imprimir ansiedade e desconfiança.

Além do impacto direto em trabalhadores, também deve ser considerado o risco de exposição acidental do público em geral, incluindo estudantes, funcionários, manutenção e visitantes. Sem um controle rigoroso dessas áreas, a possibilidade de circulação acidental do público aumenta. Isto não só põe em perigo a saúde destes indivíduos, mas também pode levar a uma série de complicações legais, por exemplo, para as universidades, uma vez que podem enfrentar ações judiciais.

Outro grande problema associado é o impacto ao meio ambiente. Fontes de radiação não controladas podem levar à contaminação do solo e água, causando danos a longo prazo ao ecossistema. A descontaminação de áreas afetadas pela radiação é um processo caro e complexo que pode exigir anos de trabalho e recursos significativos, além de ter um impacto negativo na biodiversidade local.

Circunstâncias extremas, como quantidades significativas de exposição à radiação, são claramente menos prováveis de ocorrer em ambientes universitários. A radiação ionizante não é usada com tanta frequência ou intensidade em ambientes de pesquisa acadêmica como em aplicações de energia industrial ou hospitais.

No entanto, a falta de conhecimento da comunidade científica sobre os efeitos de baixas taxas de doses de radiação ionizante durante um longo do tempo gera preocupações. Em [SEVER et al. \(1988, p.577\)](#) retrata-se sobre os impactos adversos, um ano após o incidente de Césio-137 em Goiânia

"Um acidente ocorreu em Goiânia, Brasil, em 1987, resultando em exposições externas agudas iniciais de corpo inteiro, seguidas por uma exposição crônica de corpo inteiro em baixa taxa de dose, devido à deposição interna de cloreto de Césio-137 (proveniente de uma fonte de teleterapia danificada). Além disso, muitas pessoas sofreram lesões localizadas agudas por radiação (beta/gama) na pele e em tecidos mais profundos."([SEVER et al., 1988, p.577](#));Tradução livre.

Esse problema é agravado pela falta de compreensão dos profissionais atuantes, ou, até mesmo, em algumas situações, pela indiferença relativa à necessidade e às vantagens de se seguir um guia rigoroso de radioproteção. Por vezes, a falta de consciência pode por em risco não só sua própria segurança, mas também a de seus alunos.

Como resultado, independentemente do grau de exposição, a adoção e adesão aos padrões de radioproteção é fundamental em todas as situações onde a radiação ionizante, direta ou indireta, está presente, isto, incluindo ambientes universitários.

Em um estudo de mesmo caráter a este, - promover uma cultura de segurança e diminuir os riscos da exposição à radiação em laboratórios universitários - [Root et al. \(2020\)](#) apresentou melhorias significativas em relação ao encontrado antes do trabalho ser realizado. Isto gera expectativas otimistas em relação à presente investigação.

Ao identificar os pontos positivos e negativos das práticas de proteção contra a radiação, a pesquisa poderá ser um incentivo se adaptar a protocolos de segurança vigentes e aprimorar o monitoramento da radiação. Adicionalmente, o estudo poderá exercer papel de exemplo para outras instituições de ensino que desejem avaliar e melhorar suas medidas de proteção contra radiação.

Com esse escopo, este trabalho tem a intenção de ao menos apontar e sugerir soluções a esses impasses, agregando ao tópico de controle radioativo dentro de instituições de ensino superior.

Da expectativa principal sobre os resultados a serem gerados por este trabalho, está o auxílio e parceria com as coordenadorias responsáveis pelo gerenciamento de resíduos radioativos, convergindo para um objetivo comum de segurança aos indivíduos que frequentam o ambiente universitário.

1.2 Objetivos

Dentre os objetivos gerais deste trabalho, temos a avaliação à conformidade das práticas de proteção radiológica nos laboratórios de pesquisa da Universidade de Brasília com as diretrizes nacionais estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), procurando identificar os principais desafios operacionais que afetam a implementação dessas normas no ambiente acadêmico. Inicialmente, a pesquisa foi conduzida nos laboratórios do Instituto de Física, e se expandiu para os laboratórios dos Institutos de Geologia, Química, Ciências Biológicas e a Faculdade de Tecnologia (FT).

Primeiramente, buscou-se compreender o nível de descentralização da gestão da radioproteção na universidade, investigando a existência (ou a ausência) de um controle unificado sobre as fontes radioativas e equipamentos geradores de radiação ionizante. Além disso, procurou-se um sistema institucionalizado de registro, monitoramento e rastreamento dessas fontes ou se a responsabilidade recai individualmente sobre cada usuário.

Outro objetivo essencial foi analisar a adequação do estoque de radioisótopos e materiais radioativos presentes nos laboratórios, considerando a relação entre quantidade, atividade acumulada e real necessidade de uso. Buscou-se determinar se há um acúmulo desnecessário de fontes e quais são as implicações dessa prática para a segurança radiológica e a conformidade regulatória.

Também foi do escopo deste estudo verificar se as atividades desenvolvidas com fontes radioativas nos laboratórios de ensino se mantêm dentro dos limites de isenção estabelecidos pela CNEN, identificando se haveria necessidade de um controle regulatório e quais seriam os impactos práticos dessa regulamentação na dinâmica experimental de pesquisa acadêmica.

Por fim, este trabalho buscou fornecer recomendações para aprimorar a gestão da radioproteção na universidade, propondo possíveis estratégias para otimizar a administração de fontes radioativas e equipamentos e reduzir o acúmulo desnecessário de materiais. Pretendeu-se, assim, contribuir para a construção de um ambiente acadêmico mais seguro no Campus Darcy Ribeiro, alinhado às normas nacionais e internacionais de proteção radiológica, garantindo que o uso da radiação ocorra de forma responsável e sustentável a longo prazo.

2 Metodologia

O trabalho foi estruturado de forma a esclarecer a atual forma de aplicação das diretrizes de radioproteção em laboratórios de pesquisa da Universidade de Brasília que se utilizam de fontes de radiação ionizante. Esta metodologia tem como base tanto as normas nacionais orientadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) como a NN 3.01 e a NN 6.02, quanto as considerações éticas necessárias ao se envolver com instituições públicas acadêmicas.

Uma abordagem de métodos mistos foi adotada, combinando técnicas de pesquisa majoritariamente qualitativas e, posteriormente, em menor escala, quantitativas, de forma a se alcançar os objetivos propostos.

A natureza deste trabalho seguiu um caráter majoritariamente exploratório e descritivo, com o intuito de identificar e analisar não só o grau de conformidade com as diretrizes de radioproteção em ambientes universitários, mas também, a disposição geral da Universidade de Brasília perante à existência de fontes radioativas no campus.

Com múltiplos objetivos o estudo foi organizado em etapas principais: localizar laboratórios com uso de fontes de radiação ionizante dentro da universidade, avaliar a presença e a adequação dos planos de radioproteção, examinar os procedimentos para o manejo de materiais radioativos. Também se viu como objetivo o levantamento radiométrico do laboratório de ensino do Instituto de Física.

2.1 A Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento deste estudo, servindo como base para a compreensão dos princípios de proteção radiológica e suas aplicações em ambientes acadêmicos e laboratoriais. A pesquisa de literatura seguiu uma abordagem sistemática, envolvendo fontes como artigos científicos, livros, normas internacionais e documentos históricos. Especial atenção foi dada às recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e de outras entidades reguladoras reconhecidas, como o National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) e a International Atomic Energy Agency (IAEA), que oferecem diretrizes essenciais para a radioproteção em diferentes contextos.

O levantamento de dados incluiu a consulta de publicações clássicas e contemporâneas, com o objetivo de identificar a evolução das políticas de proteção radiológica desde o início do século XX até os dias atuais. Documentos como o "ICRP Publication 103" e as

publicações da UNSCEAR foram fundamentais para compreender os critérios modernos de proteção radiológica, especialmente no que se conhece sobre a categorização de riscos e limites de dose aceitáveis para indivíduos ocupacionalmente expostos. A pesquisa incluiu ainda uma análise histórica, desde o descobrimento da radiação até recomendações internacionais, destacando eventos como o Segundo Congresso Internacional de Radiologia em Estocolmo, em 1928, que marcou o início das políticas globais de proteção contra radiação ionizante.

Revisou-se também, detalhadamente, a literatura sobre as interações da radiação com a matéria, incluindo seus meios e os efeitos biológicos decorrentes. Livros como *Física das Radiações*, por Emiko Okuno, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, por Frank H. Attix e *Radioproteção e Dosimetria*, por Tahuata, dentre outros, forneceram o embasamento teórico, o que permitiu um melhor entendimento da radiação e seus mecanismos de interação, e, conseqüentemente, justificou e validou os diversos motivos para a existência das normas de radioproteção.

2.2 Levantamento de Locais e Localização de Responsáveis

A pesquisa teve como seu primeiro passo uma tentativa de mapeamento das instalações de pesquisa da universidade para identificar laboratórios e departamentos onde a radiação ionizante é utilizada. Isso envolveu a revisão de registros universitários, a consulta com professores e a realização de visitas aos locais.

Uma vez identificados os departamentos e laboratórios que se utilizam de radiação ionizante, o próximo passo foi estabelecer contato com os responsáveis por cada laboratório de cada departamento respectivo.

Foram contatados 5 responsáveis do Instituto de Física, 2 do Instituto de Geologia, 2 do Instituto de Química e 2 do Instituto de Geologia, apesar de nem todos terem fornecido retorno.

Nesta etapa primordial de pesquisa, também se viu necessária a identificação dos órgãos auxiliares e decanatos responsáveis por autorizações de compra, no escopo da Universidade de Brasília, da fiscalização ao seu recolhimento. De início, se teve a expectativa de conseguir traçar a maior parte do caminho burocrático, dentro do administrativo da universidade, perante a aquisição de fontes de radiação, do instituto aos conselhos superiores.

2.3 As Entrevistas

Entrevistas semiestruturadas foram conduzidas com cada profissional responsável, focando em vários pontos-chave: a existência e o escopo dos planos de radioproteção, os

tipos e atividades das fontes de radiação ionizante em uso, as hierarquias de responsabilidade perante a CNEN, os processos de aquisição e licenciamento de materiais radioativos e as medidas de blindagem implementadas para proteger os indivíduos da exposição à radiação. Também foi de interesse a informação da obrigatoriedade ou não do uso de dosímetros pessoais ou outros tipos de EPIs.

Foi dada atenção especial à existência e necessidade de planos de radioproteção. O único plano em que teve-se acesso em totalidade foi analisado, incluindo a identificação de potenciais perigos no armazenamento das fontes e os procedimentos para monitorar os níveis de radiação.

Além disso, das entrevistas tentou-se obter informações sobre o projeto arquitetônico dos laboratórios, especificamente a limitação das áreas restritas, supervisionadas e livres, uma vez que essa organização espacial é crucial para minimizar a exposição à radiação de trabalhadores e estudantes, envolvidos ou não envolvidos com o trabalho de pesquisa do laboratório.

A pesquisa também teve como objetivo analisar os procedimentos para o recolhimento de fontes radioativas. Os responsáveis foram entrevistados sobre os métodos usados para descomissionar resíduos, as instalações para armazenamento a longo prazo. Esperou-se obter informações sobre seu relacionamento com a CNEN e de que forma o órgão mantém uma fiscalização. Esta etapa das entrevistas permitiu uma melhor uma visão geral do problema tratado, elucidando também as limitações da pesquisa.

Do formato geral da entrevista seguiram os principais tópicos a serem questionados:

- Quais as atividades das fontes presentes no laboratório;
- Quais os procedimentos para baixa e descomissionamento de fontes;
- Quem é o responsável superior e seu título;
- Existe alguma fiscalização de taxa/ exposição à dose?;
- A CNEN exige relatórios de monitoramento?;
- O laboratório possui um Plano de Radioproteção (PPR) registrado?;
- É necessário o uso de dosímetros individuais? Se sim, quem os fornece?;
- A CNEN exerce uma fiscalização rigorosa perante as normas? Em qual intervalo de tempo?;

Dentre outros tópicos no tema, a depender do órgão a ser fiscalizado ou responsável, questionamentos específicos foram ponderados, tornando uma entrevista individualizada.

2.4 O Estudo de Observação Radiométrica

Em meio à conclusão da etapa qualitativa da pesquisa, o estudo avançou para a análise quantitativa dos níveis de radiação ionizante, especialmente no laboratório de ensino do Instituto de Física, com o objetivo de verificar, de maneira empírica, os níveis de exposição nos pontos selecionados do laboratório. Essa etapa não deve de forma alguma ser confundida com um levantamento radiométrico profissional, e não deve ser tida como válida para maiores conclusões legais. Se teve como foco, somente comparar as medidas com os limites estabelecidos pelas normas vigentes da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sabendo das grandes incertezas associadas.

Inicialmente, teve-se como objetivo a medição por dosímetros de área, que ficariam estacionados em pontos estratégicos ao redor das fontes. Infelizmente, este feito não foi possível, com justificativas comentadas na seção de discussões, adiante neste estudo. Efetivamente, a medição foi realizada por um contador Geiger-Müller ao longo de aproximadamente quatro horas. Apesar de possuir um ponto de saturação, não foi uma preocupação significativa no estudo devido as baixas taxas de dose emitidas pelas fontes.

As leituras foram realizadas em diversos pontos do laboratório referido, abrangendo tanto áreas próximas às fontes de radiação quanto regiões de circulação de indivíduos não ocupacionalmente expostos. Nos pontos selecionados, também foram feitas medições à um metro, radialmente, do local da fonte, e em distâncias mais próximas, além de medições simulando o uso destas fontes no cotidiano.

Os dados coletados foram compilados de forma a se estimar, mesmo que com grandes incertezas, os níveis de exposição presentes. A interpretação dos resultados considerou as atividades específicas realizadas em cada laboratório, ponderando a frequência e a natureza das exposições. A análise também buscou avaliar a eficácia das barreiras físicas as quais os radioisótopos do laboratório estão inseridos.

2.5 População da Pesquisa

Os indivíduos expostos à radiação ionizante nos laboratórios analisados constituem a população alvo do estudo, incluindo tanto os ocupacionalmente expostos — professores, pesquisadores, alunos de pós-graduação e técnicos — quanto aqueles presentes regularmente nos ambientes, como estudantes de graduação, visitantes e funcionários de limpeza. Serão considerados, também, indivíduos que trabalham em áreas adjacentes a laboratórios com fontes radioativas, caso exista possibilidade de exposição indireta.

É de interesse de pesquisa a arquitetura dos locais e seu planejamento inicial, questionando principalmente a existência ou necessidade de blindagem adicional, além dos próprios castelos das fontes radioativas.

Além disto, se teve objetivo de investigar a delimitação das áreas, entre restritas, supervisionadas e de livre acesso, questionamento indagado principalmente sobre os laboratórios de ensino, que são públicos e não possuem restrição clara de acesso.

2.6 A Análise

Uma análise inicial contemplou a realização de cálculos de forma a encontrarmos a categoria de cada fonte considerada, isto, perante a Tabela 3, no caso fontes seladas. Além disto, consistirá na compilação das informações obtidas e a verificação destas quando comparados com as normas nacionais exigidas.

Com a combinação de dados qualitativos e quantitativos, foram elaboradas recomendações no objetivo de melhorar as práticas de radioproteção vigentes nos departamentos investigados. Sugestões foram feitas com base nas diferenças encontradas entre os métodos usados atualmente nos laboratórios de pesquisa da Universidade de Brasília e os padrões globais, bem como no retorno fornecido pelos responsáveis durante as entrevistas.

2.7 Considerações

As considerações éticas desempenham um papel central nesta pesquisa, especialmente devido à natureza sensível da segurança radiológica e às potenciais implicações para a universidade e seus colaboradores. O estudo foi estruturado de modo que todas as interações com os participantes fossem realizadas de forma respeitosa e cuidadosa, garantindo um ambiente de diálogo.

Ressalta-se que o propósito da pesquisa não foi de criticar ou expor, de maneira pejorativa, eventuais lacunas nas práticas de radioproteção adotadas pela instituição. Reitero que o objetivo principal é fomentar um debate reflexivo e propositivo sobre possíveis melhorias nos procedimentos de segurança, contribuindo para o fortalecimento das medidas de proteção radiológica em conformidade com as normas vigentes e as melhores práticas recomendadas.

Outra consideração a ser feita é relacionada à natureza do estudo. Devido à sua alta dependência de respostas de contato dos responsáveis, o estudo, por vezes, não conseguiu cumprir com detalhamento o inicialmente previsto, principalmente, relacionado à outros departamentos.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 A Radiação

3.1.1 Uma perspectiva histórica

O histórico das investigações sobre radiação remonta ao final do século XIX que culminaram em uma revolução científica, estabelecendo as bases da ciência moderna. O físico alemão Wilhelm Röntgen, em 1895, realizava experimentos passando descargas elétricas por um tubo de vácuo, este, coberto por um papel preto que bloqueava majoritariamente a luz visível. Em meio à uma de suas sessões experimentais, percebeu que certos materiais fluoresciam quando colocados próximo ao tubo, mesmo quando o papel preto estava presente. Em seu relatório '*ON A NEW KIND OF RAYS*', [W. C. Röntgen \(1896\)](#) testou a capacidade de diversos materiais em bloquear ou permitir a passagem dos então chamados Raios-X, relatando que papéis, madeira, alumínio e até metais finos eram "parcialmente transparentes" à radiação, enquanto metais mais densos, como chumbo e platina, eram mais opacos.

Também observou-se que a fluorescência e as imagens formadas em placas fotográficas confirmavam a existência e a trajetória retilínea dos raios-X e demonstrou que a intensidade da radiação diminuía conforme a espessura do material aumentava. Portanto, Röntgen propôs que os raios-X poderiam ser uma nova forma de radiação ainda não compreendida. Este feito pioneiro lhe rendeu o primeiro Prêmio Nobel de Física em 1901 e inaugurou o que seria um dia o campo da radiografia médica ([W. C. Röntgen, 1896](#)).

Inspirado por essa descoberta, o físico francês Henri Becquerel investigou se materiais fosforescentes poderiam emitir raios semelhantes. Inicialmente, Becquerel acreditava que essa radiação estava associada à fluorescência, mas para sua surpresa, após deixar os sais de urânio acima de uma placa fotográfica na ausência de luz por dias, e, ainda sim revelar imagens com alto contraste, concluiu que a emissão era intrínseca e espontânea ao material ([BECQUEREL, 1896](#)). Em experimentos posteriores, Becquerel verificou que os compostos de urânio emitiam radiações mais intensas do que suas formas metálicas e que possuía comportamento similar aos então chamados de Raios-x, sequência de eventos que denominou os "Raios de Becquerel- a radioatividade ([RADVANYI; VILLAIN, 2017](#)).

Pierre e Marie Curie expandiram os estudos de Becquerel ao investigar outros materiais que também poderiam emitir radiação. A partir de suas pesquisas, o casal Curie percebeu que dois minerais, a Uranita e a Calcolita, eram mais ativos que o próprio urânio, o que indicaria a presença de um elemento ainda mais radioativo. Foi então que, em julho de 1898, anunciariam a descoberta de um novo elemento, nomeado polônio,



Figura 1 – Imagem em placa fotográfica de uma mão com anel, diretamente de seu report 'ON A NEW KIND OF RAYS'

Fonte: (W. C. Röntgen, 1896)

em homenagem à terra natal de Marie, tendo pela primeira vez se utilizado do termo "radioatividade" para descrever o fenômeno advindo de radioisótopos, até então chamado de "Raios de Becquerel" (CURIE; SKLODOWSKA-CURIE, 1898). Logo após, em dezembro do mesmo ano, os Curie, confirmaram a existência de um segundo novo elemento radioativo, o rádio.

Experimentos com campos magnéticos mostraram que alguns raios emitidos por materiais radioativos, como os do rádio, podiam ser desviados, enquanto outros não eram afetados, revelando que o comportamento das radiações poderia ser mais complexo do que se imaginava.

Nos anos seguintes, entre 1902 e 1903, Rutherford e Frederick Soddy fizeram a descoberta que a radioatividade envolvia as transformações espontâneas de elementos, desintegração nuclear, entendimento este que foi fundamental para o desenvolvimento da teoria das séries de decaimento radioativo (RUTHERFORD; SODDY, 1902).

Além disto, observou a absorção de radiação por lâminas de alumínio, identificou duas categorias principais de radiação - a radiação alfa, facilmente absorvida, e a radiação

beta, mais penetrante ([RUTHERFORD; SODDY, 1903](#)).

3.1.2 A Radiação Ionizante e Não Ionizante

A radiação ionizante e não ionizante representam duas categorias fundamentais, diferenciadas por seus níveis de energia, modos de interação com a matéria e potenciais efeitos biológicos, sendo de essencial entendimento para a formulação de padrões de segurança.

A radiação ionizante, que inclui ondas eletromagnéticas de alta energia, como raios X e raios gama, bem como partículas subatômicas, como alfa e beta, possui energia suficiente para remover elétrons fortemente ligados de átomos, resultando no fenômeno de ionização. Este processo, que altera a estrutura eletrônica dos átomos, pode gerar íons e radicais livres, desencadeando uma série de reações químicas potencialmente prejudiciais: desde o escopo micro - como a interação da radiação a nível molecular - até o macro gerado pelos danos celulares consequentes - queimaduras e síndrome aguda da radiação (SAR) ([OLIVER, 1973](#)).

A radiação ionizante distingue-se da radiação não ionizante justamente por suas altas energias, relacionada também a sua capacidade de ejetar elétrons fortemente ligados das órbitas atômicas: limiar de energia que se inicia entorno de 10 eV ([ICNIRP, 2020](#))

Por outro lado, a radiação não ionizante abrange formas de radiação com menor energia - geralmente abaixo de 10 eV ([LEE, 1995; ICNIRP, 2020](#)) - como ondas de rádio, micro-ondas, luz infravermelha e luz visível. Apesar de não possuir energia suficiente para ionizar átomos, esta faixa de radiação pode excitar elétrons, fazendo com que eles se movam para um estado de energia mais alto e gerando efeitos térmicos, como o aquecimento de tecidos biológicos, além de outros efeitos fisiológicos, a depender da intensidade e duração da exposição.

Um exemplo notável é a radiação ultravioleta (UV), que ocupa uma posição de transição entre a radiação ionizante e a não ionizante, pois as faixas no fim de seu espectro, como UVB e UVC, geram excitação eletrônica e, em alguns casos, podem causar formação de íons em determinados tecidos ([TAYLOR et al., 1989; BAATOUT, 2023](#)). Ainda assim, em níveis cotidianos de exposição, este tipo de radiação geralmente é considerada de baixo risco à saúde.

Dentre as fontes de radiação, tanto ionizante quanto não ionizante, temos exemplos de fontes naturais, como raios cósmicos e o gás radônio, e fontes artificiais, geralmente encontradas em aplicações médicas, industriais e em pesquisas científicas.

Importante pontuar que as organizações responsáveis pelo regulamento de cada faixa de radiação são diferentes. Mesmo com o título International Commission of Radiological Protection (ICRP), a própria organização explícita que as recomendações feitas são

exclusivas para radiações do tipo ionizante (ICRP, 2007, p. 38), indicando a International Commission of Non-Ionizing Radiation (ICNIRP) como a responsável pelas recomendações referentes à radiação não ionizante.

3.1.3 Radiação Indireta e Diretamente Ionizante e seus Mecanismos de Emissão

A radiação ionizante ainda pode se dividir em subclasses - diretamente e indiretamente ionizante - com base em seus mecanismos de interação com a matéria, e, consequentemente, efeitos biológicos. A radiação indiretamente ionizante é composta por partículas sem carga, como fótons e nêutrons, enquanto sua variante diretamente ionizante é composta por partículas carregadas - alfa, beta, prótons (OKUNO; YOSHIMURA, 2016). Nesta seção, teremos foco principal na perspectiva física dos fenômenos de emissão radiativa.

Considerando os mecanismos de transferência de energia, a radiação diretamente ionizante principalmente por meio de colisões diretas com nuvens eletrônicas, resultando na ionização ou excitação de estados atômicos. Devido à presença de carga, e, a depender do tipo de partícula, massa, estas partículas perdem mais energia durante as interações. Com as diferenças entre meios de transferência de energia, é possível de se observar também a variação de comportamento em efeitos biológicos.

A ionização direta tende a causar danos celulares imediatos e localizados, devido à interação direta com componentes celulares, o que pode levar à produção de radicais livres e disfunção celular. Já a ionização indireta pode provocar a formação de espécies reativas de oxigênio, que causam danos estruturais às células ao longo do tempo. Esse mecanismo indireto pode desencadear efeitos em cascata nos sistemas biológicos, aumentando o risco de danos acumulativos a longo prazo (BAATOUT, 2023).

Outra diferença crucial está no poder de penetração. Partículas alfa, uma partícula de alta massa - 2 prótons e 2 nêutrons - possuem capacidade de penetração limitada e podem ser bloqueadas por uma folha de papel, ou ainda, pela camada externa da pele humana. Partículas beta, por sua vez, possuem maior poder de penetração, embora ainda sejam menos penetrantes que raios gama e raios X. Esta diferença se deve não só pela alta diferença de carga, em módulo, mas também pela seção de choque e velocidades atingidas.

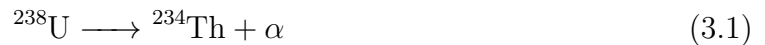
Formas de Emissão de Radiações Diretamente Ionizantes

Dentre as principais partículas diretamente ionizantes e suas formas de emissão temos:

Partículas Alfa (α) São compostas por 2 prótons e 2 nêutrons (núcleo de hélio).

São emitidas por núcleos instáveis de elementos pesados - possuem uma grande quantidade de prótons e nêutrons, o que gera uma intensa repulsão eletrostática -, como o urânio-238 e o rádio-226, possuem massa elevada e um poder de ionização elevado, apesar de seu alcance ser de apenas alguns centímetros na maior parte de materiais. Apesar de por vezes ser chamada de "Radiação Alfa", é uma partícula com energia discreta.

Exemplo de decaimento por partícula alfa:



Partículas Beta (β) Podem ser consideradas partículas beta **elétrons** (β^-) ou **pósitrons** (β^+) e são emitidas por núcleos instáveis durante processos de decaimento beta. Tem a massa cerca de 7300 vezes menor do que a partícula alfa e, apesar de ter uma maior penetração, apresenta menor densidade de ionização. Enquanto para sua variação β^- um núcleo de apresentar um excesso de nêutrons - liberando um elétron e um antineutrino -, para sua variação β^+ , este deve apresentar um excesso de prótons, - emitindo um pósitron e um neutrino. Importante ressaltar que a presença do neutrino no produto do decaimento permite uma energia variável entre partículas, o que gera um espectro contínuo de energia.

Exemplos de decaimento beta:

- *Decaimento Beta Negativo (β^-)*



- *Decaimento Beta Positivo (β^+)*



Prótons e Íons Pesados Também podem ser emitidos por núcleos instáveis, com excesso desta partícula, em processos nucleares, assim como íons pesados. Em alguns casos, núcleos ricos em prótons podem estabilizar-se por decaimento β^+ , onde um próton se converte em um nêutron. No entanto, quando a energia de ligação do próton é insuficiente, a emissão de prótons se torna preferida ao do decaimento β^+ .

Exemplo de emissão de próton:



Formas de Emissão de Radiações Indiretamente Ionizantes

Raios-X Podem ser gerados por diversos processos, sendo os tubos de raios X uma das principais fontes. Nestes dispositivos, elétrons acelerados em alta velocidade atingem um alvo metálico, como tungstênio ou molibdênio, provocando a emissão de raios X

através de dois mecanismos principais: a radiação de frenagem, ou bremsstrahlung, e a radiação característica. Além destes, aceleradores de partículas também produzem raios X, onde partículas carregadas, como elétrons, são aceleradas até altas velocidades e, ao serem desviadas por campos magnéticos, emitem radiação síncrotron. Dentre as fontes, temos ainda as naturais, temos os raios emitidos por fontes astrofísicas, descargas elétricas atmosféricas.

Em laboratórios de pesquisa, as fontes mais comuns encontradas são Difrátômetros de Raio-X(XRD), instrumentos utilizados geralmente para analisar a estrutura cristalina dos materiais, baseando-se na técnica de interação dos raios com os planos atômicos da amostra. Assim, é possível identificar um padrão de difração que permite caracterizar sua composição e organização cristalina, por meio do princípio da Lei de Bragg - que relaciona o ângulo de incidência, o comprimento de onda dos raios X e a distância entre os planos cristalinos.

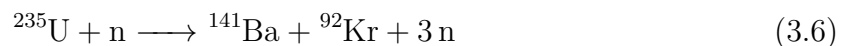
Raios Gama (γ) São ondas eletromagnéticas de alta energia emitidas por núcleos instáveis em processos de transição nuclear, que precisam liberar energia em excesso para alcançar um estado fundamental mais estável. Esse processo é análogo à emissão de fótons por átomos em transições eletrônicas, mas ocorre no núcleo atômico, onde prótons e nêutrons rearranjam-se para alcançar uma configuração de menor energia. Além disto, também pode ser emitida por aniquilação de matéria e anti-matéria (GIBBONS; KHAN, 2014).

Exemplo de emissão γ por decaimento:



Nêutrons Os nêutrons são partículas neutras emitidas, assim como sua maioria, por processos nucleares em que um átomo instável, com excesso desta partícula, libera nêutrons livres como forma de estabilizar seu núcleo

Exemplo de emissão de nêutrons:



Devido à uma análise voltada à proteção radiológica, os efeitos pela emissão radioativa de nêutrons não será explorada, uma vez que, no contexto, não são comuns acidentes causados por fontes artificiais de nêutrons.

Devido a este fato, trataremos adiante não das classificações de radiação ionizante e não ionizante, mas sim por radiações eletromagnéticas e carregadas e suas interações com a matéria.

3.1.4 A Radiação Eletromagnética sua Interação com a Matéria

A radiação eletromagnética, geralmente, tem início ao seu processo de interação com a transferência de energia para átomos ou moléculas, por ora, em sua forma não iônica, como por exemplo, as moléculas de água, gerando partículas carregadas secundárias. Esse processo composto pode resultar em ionizações adicionais ao longo do trajeto das partículas secundárias emitidas, formando uma dinâmica geral de transferência de energia (GIBBONS; KHAN, 2014; ATTIX, 2008).

Devido a sua alta dependência da energia do fóton incidente, como veremos nas seções a seguir, os mecanismos de interação com a matéria deste tipo de radiação seguem comportamentos característicos de atenuação e predominância, a depender da faixa de energia e número atômico do material. Para uma melhor visualização, seguem, nas Figuras 2 e 3, os comportamentos respectivos para faixas de energia da ordem de MeV, comportamento de essencial compreensão, principalmente ao tratarmos de efeitos biológicos e medidas de radioproteção.

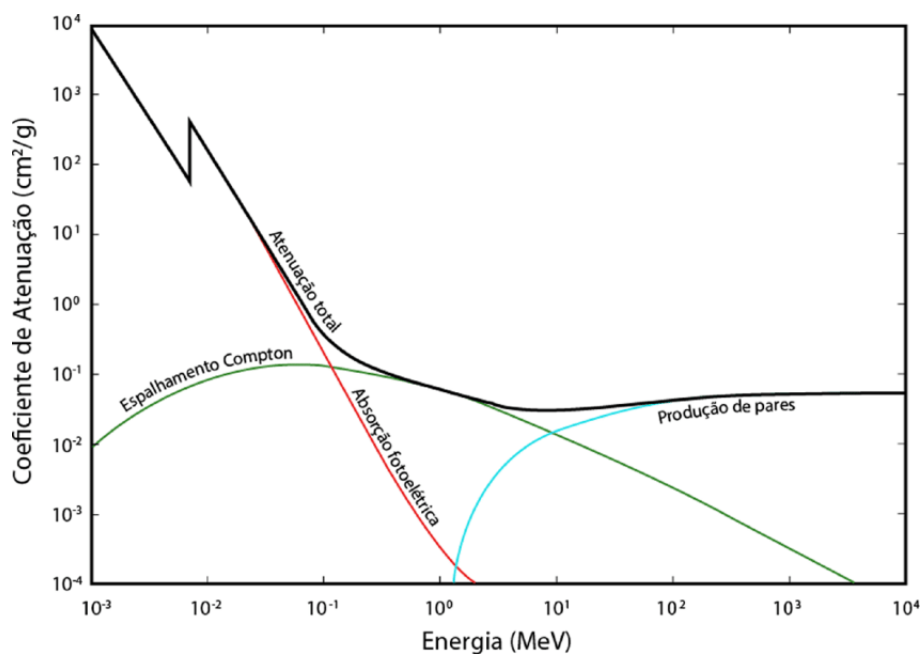


Figura 2 – Comportamento de atenuação de diferentes meios de interação com a matéria perante a energia da radiação

Fonte: (SÁ et al., 2016)

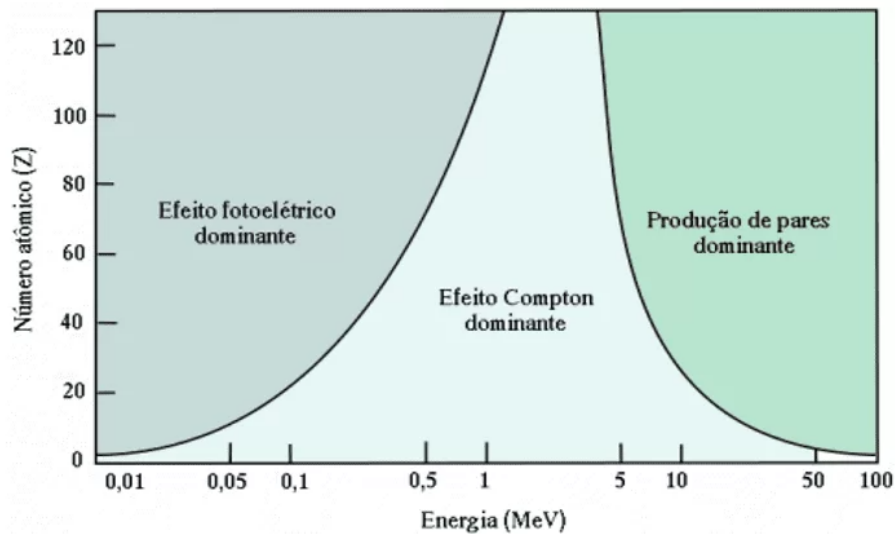


Figura 3 – Probabilidade da ocorrência dos principais processos de interação com a matéria. A linha preta contínua presente no gráfico sinaliza onde a probabilidade de acontecimento dentre os efeitos é virtualmente igual

Fonte: (ATTIX, 2008)

Dentre os principais mecanismos e efeitos da interação de radiação eletromagnética com a matéria temos:

Efeito Fotoelétrico

Durante este processo, a energia total do fóton incidente, representada por $E = h\nu$, é primeiramente absorvida pelo átomo e, em seguida, transferida para o elétron a ser ejetado de seu orbital de origem, este, denominado de fotoelétron. Sua energia cinética pode comumente ser descrita pela equação 3.7, onde o termo E_b é a energia de ligação do elétron:

$$E_{cin} = h\nu - E_b \quad (3.7)$$

Após a ejeção do elétron, uma lacuna é criada na camada orbital, resultando em um íon. A ausência é rapidamente preenchida por um elétron de uma camada mais energética, resultando no fenômeno de emissão de raios X característicos. Dentre outros efeitos, também é possível que ocorra a emissão de elétrons Auger - partículas monoenergéticas produzidas ao ocorrer a absorção, interna ao átomo, da energia de raios X característicos (GIBBONS; KHAN, 2014, p. 65).

A probabilidade máxima de interação para o fenômeno fotoelétrico se encontra na faixa energética do fóton que se assemelha ou é maior que a energia de ligação do elétron, sendo proporcional à um fator energético de E^{-3} e um fator de número atômico Z^n - a variável n em valores entre 3 e 5 a depender do material (PODGORSAK; SERVICE, 2010,

p. 340). Cerca de 80% das absorções fotoelétricas ocorrem com elétrons da camada K. Os 20% restantes envolvem elétrons de camadas mais externas, que estão menos fortemente ligados ao núcleo (TAUHATA et al., 2003, p. 74). É por isto também, que, como observado na Figura 3, o efeito é predominante em baixas faixas de energia - domina as interações de fótons de raios X e raios gama com energias abaixo de 50 keV, ortovoltagem.

O ângulo de emissão dos fotoelétrons também varia com a energia do fóton incidente: em baixas energias, os elétrons são emitidos predominantemente em ângulos próximos a 90 graus em relação ao feixe incidente, mas, à medida que a energia do fóton aumenta, os fotoelétrons tendem a ser emitidos em uma direção com maior alinhamento à trajetória do feixe inicial. Este fato é especialmente importante ao se considerar o cálculo de blindagem e outras medidas de radioproteção, uma vez que esta radiação secundária também tem poder de gerar efeitos biológicos localizados (GIBBONS; KHAN, 2014, p.67).

Efeito Compton

Neste processo, assim como no efeito fotoelétrico, um elétron é ejetado do átomo por meio da interação com um fóton incidente. Neste caso, porém, se observa a emissão de um fóton secundário, necessário para a conservação do momento do sistema. Quando a energia de ligação de um elétron atômico se torna desprezível ao se comparar à energia de um fóton incidente, é dito que se trata de uma interação com elétron "livre" (TAUHATA et al., 2003, p.75).

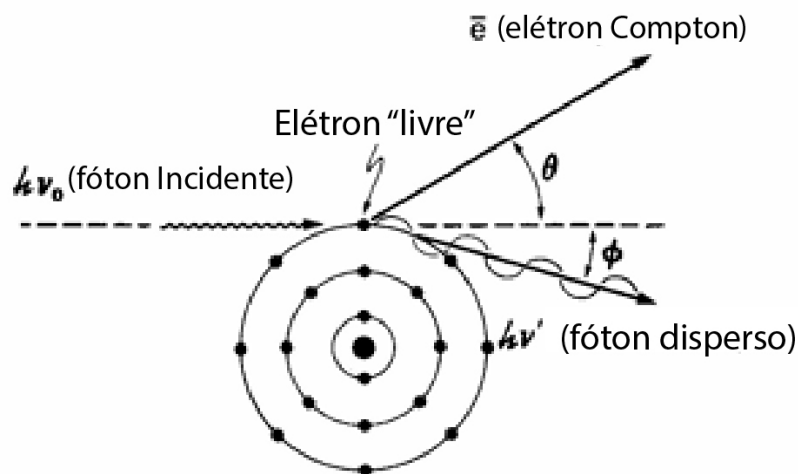


Figura 4 – Representação visual do Efeito Compton

Fonte: (GIBBONS; KHAN, 2014)

A energia transferida a este elétron pelo fóton incidente depende do ângulo de espalhamento, e, assumindo a natureza corpuscular de ambas partículas, temos a necessidade de considerar a conservação do momento. Com isto, a equação para espalhamento Compton estabelece a relação entre a variação no comprimento de onda do fóton, o ângulo de espalhamento e a massa de repouso do elétron. descrito pela fórmula:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \phi),$$

onde λ e λ' são os comprimentos de onda antes e depois do espalhamento, h é a constante de Planck, m é a massa de repouso do elétron, c é a velocidade da luz e ϕ é o ângulo de espalhamento do fóton.

Importante notar que não é possível transferir toda a energia do fóton incidente ao fóton espalhado, justamente devido à conservação do momento do sistema. Com isto, o fóton espalhado, para ângulos $\phi > 0$, possui um limiar de saturação de energia transferida, que independe da energia do fóton incidente, e está associado apenas de seu ângulo de espalhamento, observado na Figura 5. Este fato é especialmente importante para meios de radioproteção, uma vez que a blindagem pode ser otimizada considerando os limiares de transferência de energia (PODGORSAK; SERVICE, 2010, p.303).

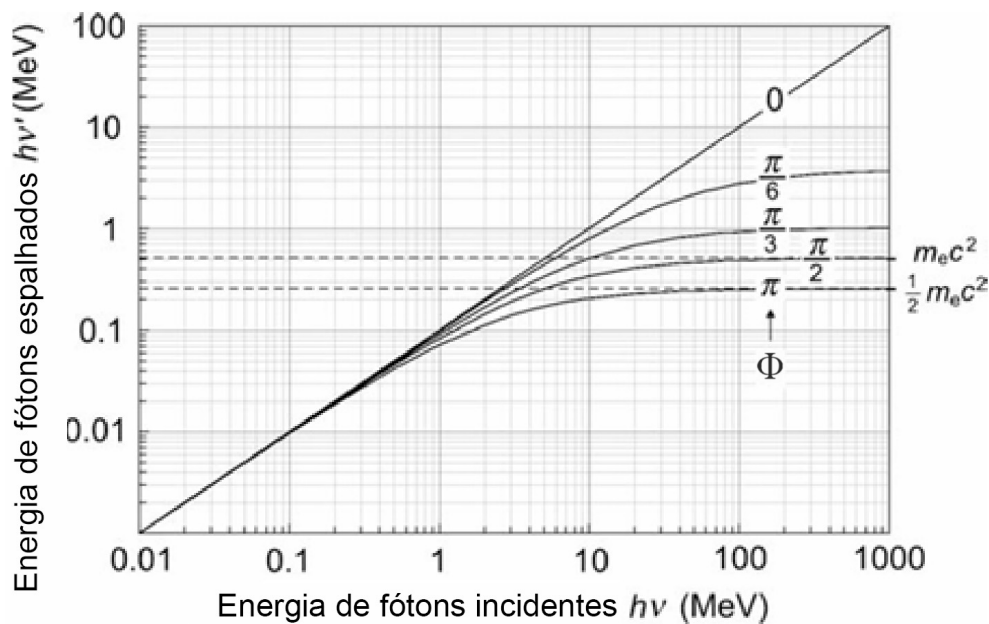


Figura 5 – Relação de transferência de energia de fóton incidente e fóton espalhado perante ao ângulo de espalhamento Compton

Fonte: (PODGORSAK; SERVICE, 2010)

Os fótons incidentes com energia suficiente podem ainda desencadear uma sequência de interações, consecutivamente, até que a energia do fóton remanescente seja suficientemente baixa para que o efeito fotoelétrico domine. Esse caminho de energia, conhecido como "trilha Compton", que distribui elétrons secundários, a maioria sendo de baixa energia, permitindo uma deposição local de energia no material. Mesmo que minoria, também existem elétrons de alta energia, que são especialmente relevantes uma vez que transportam a energia para longe do ponto de interação inicial, depositando-a mais profundamente no material irradiado e podendo causar ionizações secundárias (BAATOUT, 2023).

Importante notar que como a interação do tipo Compton envolve elétrons essencialmente livres no material que interage, ela é independente do número atômico Z , tendo sua dependência diretamente ligada à densidade de elétrons do material.

Apesar de o número de elétrons por grama variar entre os elementos, em geral, à exceção do hidrogênio, é observado valores semelhantes o suficiente, de forma que o coeficiente de atenuação massiva para o efeito Compton - atenuação por densidade do material - é aproximadamente o mesmo para todos os materiais.

No caso de um feixe de fótons cuja interação principal seja o efeito Compton, a atenuação por unidade de densidade (g/cm^2) será similar para materiais de densidades iguais. Por exemplo, um feixe de raios gama de Cobalto-60, interagindo pelo efeito Compton, terá uma atenuação equivalente em densidade quando comparados tecidos moles e ossos. Porém, devido à maior densidade eletrônica dos ossos, 1 cm de osso atenuará mais radiação do que 1 cm de tecido mole.(ATTIX, 2008; GIBBONS; KHAN, 2014).

Espalhamento Rayleigh

Além do espalhamento Compton, um outro tipo de interação, menos comum, pode ocorrer quando um fóton de alta energia interage de maneira coerente com todos os elétrons de um átomo absorvedor. Esse processo, conhecido como espalhamento coerente ou espalhamento de Rayleigh, não provoca ionização nem excitação do átomo, mantendo a mesma energia que possuía antes da interação. Por esse motivo, essa forma de espalhamento é frequentemente ignorada nas discussões básicas sobre interações de raios gama, uma vez que não há transferência significativa de energia para o meio absorvente.

Embora o espalhamento coerente não altere a energia do fóton, ele modifica sua direção. A probabilidade desse tipo de espalhamento ocorre principalmente em energias baixas de fótons, geralmente inferiores a 20 keV, e sua relevância diminui conforme a energia do fóton aumenta. Em materiais de alto número atômico, como chumbo e tungstênio, o espalhamento coerente é mais expressivo em comparação a materiais leves, mas mesmo assim sua importância prática se restringe a energias baixas (TAUHATA et al., 2003; KNOLL, 2010).

Produção de pares e Aniquilação

A produção de pares se trata de um processo de interação entre um fóton de alta energia e o campo elétrico de um núcleo atômico, ao qual a energia do fóton incidente é convertida em duas partículas - elétron e pósitron. Esse fenômeno só é observado caso a energia do fóton incidente seja de, pelo menos, 1,022 MeV, valor correspondente à soma da energia de repouso do par elétron-pósitron, $E = m_0c^2 = 0,511\text{MeV}$. Quaisquer diferença de energia presente no processo é convertida em energia cinética para as partículas recém formadas (KNOLL, 2010).

Devido à necessidade de interação com um núcleo, este efeito é mais comumente observado em elementos de número atômico elevado, devido a uma maior intensidade de seu campo. Em tecidos biológicos, onde predominam elementos leves como carbono, oxigênio e hidrogênio, essa interação torna-se significativa apenas quando a energia do fóton supera 10 a 20 MeV - faixa em que a produção de pares começa a competir de maneira expressiva com outros mecanismos de interação, como o efeito Compton e a absorção fotoelétrica - como podemos observar na Figura 3.

Após sua formação, o pósitron gerado pela produção de pares percorre uma curta distância no material até encontrar um elétron, o que leva ao processo de aniquilação. Sua massa, então, é convertida em dois fótons de raios gama, cada um com uma energia de 0,511 MeV, que são emitidos em direções antiparalelas devido a conservação de momento do sistema.

3.1.5 Radiação Diretamente Ionizante e sua Interação com a Matéria

Diferente das radiações sem carga, como fótons e nêutrons, que podem atravessar materiais sem interação ou perder energia em eventos esporádicos, partículas carregadas perdem energia continuamente. Isso se deve aos campos elétricos que as envolve, causando interações constantes com elétrons ou núcleos atômicos. (GIBBONS; KHAN, 2014, p.74)

Dentre as partículas carregadas, ainda se diferem os mecanismos de perda de energia e de espalhamento, que variam significativamente entre partículas leves, como elétrons e pósitrons, e partículas pesadas, como alfa e fragmentos de fissão.

A probabilidade de colisão é quantificada pela seção de choque, que varia conforme o tipo de interação -eletromagnética ou nuclear. A seção de choque para interações com a nuvem eletrônica é consideravelmente maior do que com o núcleo, indicando que as interações com os elétrons dominam o comportamento das partículas carregadas na matéria.

Pela Figura 6, temos definidos o raio do átomo clássico, convencionalmente dado por " a " e o parâmetro de impacto " b ".

Dentre os principais mecanismos e efeitos de interações de partículas carregadas com a matéria temos:

Excitação e Ionização

Quando uma partícula carregada passa por um material, pode transferir energia suficiente para excitar elétrons de uma camada a outra de maior nível de energia. Este evento também pode ser chamado de Colisão "Suave", $b \gg a$ e é o mais frequente, representando cerca de metade da energia transferida para o meio.

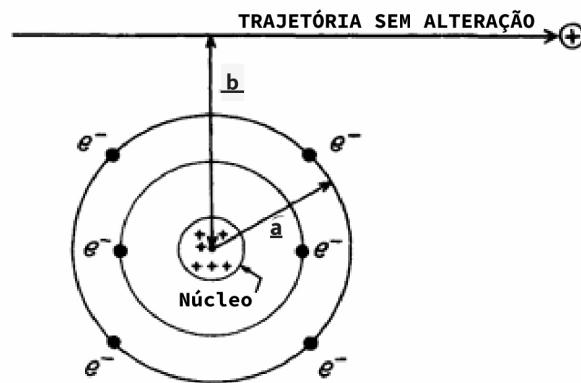


Figura 6 – Esquemática de referência para interações coulombianas e seus parâmetros colisionais, com "a" sendo o raio do átomo clássico e "b" o parâmetro de impacto

Fonte: (ATTIX, 2008, p. 161)

Outro tipo de evento ocorre quando $b \approx a$, chamadas de "Colisões Duras", quando há a colisão de partículas carregadas com elétrons, estes que serão ejetados com energia cinética considerável. Essas interações podem gerar não só partículas secundárias, mas como também podem interagir com elétrons de camadas internas gerando, como consequência, raios-x característicos ou elétrons Auger. Essas colisões são menos frequentes, mas transferem uma quantidade significativa de energia (ATTIX, 2008, p.162)

Radiação de Bremsstrahlung

Partículas carregadas que passam a distâncias $b \ll a$, desaceleram perto do campo elétrico de um núcleo atômico e emitem radiação eletromagnética, chamada de Bremsstrahlung, ou também chamada, radiação de freamento. Esse efeito é mais significativo para elétrons e pósitrons de alta energia - acima de 10 MeV - e depende do número atômico do material alvo, predominando em números atômicos elevados. No caso específico do pósitron, também pode se observar o evento de sua aniquilação durante voo, emitindo dois fótons antiparalelos com energias de pelo menos 0,511 MeV, massa de repouso da partícula. Okuno e Yoshimura (2016, p.137) também traz uma perspectiva de proteção radiológica, uma vez que tanto os elétrons de alta energia desviados como os fótons gerados pelo freamento devem ser considerados em projetos de blindagem, os últimos, mais preocupantes por possuir um maior poder de penetração.

O Poder de Freamento

Um termo essencial ao se considerar a perda de energia por partículas carregadas é o Stopping Power, ou em tradução livre, Poder de Freamento. Este descreve a perda de energia por unidade de comprimento de trajetória percorrida pela partícula. Possui duas derivações principais para descrever seu comportamento - de Bohr e de Bethe -

e é essencial para processos de dosimetria, descrevendo o comportamento de partículas pesadas no meio. Em sua secção sobre partículas carregadas, (PODGORSK; SERVICE, 2010, p.243-250), descreve amplamente ambas teorias:

A teoria de Bohr, proposta por Niels Bohr em 1913, adota uma abordagem clássica para descrever a perda de energia de partículas carregadas pesadas, como partículas α e prótons. A expressão original é dada por:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{dE_{\text{perdida}}}{dx} = 4\pi Z_1^2 \frac{e^4}{m_e v^2} n_e \ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) \quad (3.8)$$

onde:

- Z_1 é o número atômico da partícula incidente;
- e é a carga elementar;
- m_e é a massa do elétron;
- v é a velocidade da partícula incidente;
- n_e é a densidade de elétrons do meio;
- I é o potencial médio de excitação do meio.

Esta abordagem funciona bem para partículas pesadas, uma vez que, mesmo com alta energia cinética, geralmente apresentam baixas velocidades. Entretanto, esta versão da equação de freamento apresenta limitações para partículas mais leves e velocidades mais elevadas, uma vez que não considera propriedades relativísticas

A teoria de Bethe, por outro lado, adota uma abordagem quântica, levando em conta o processo de espalhamento quântico, efeitos relativísticos e as propriedades do meio. A equação clássica se reescreveu como:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{dE_{\text{perdida}}}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{m_e v^2} n_e \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (3.9)$$

onde:

- c é a velocidade da luz.

Como observado nas equações 3.9 e 3.8, o poder de freamento também possui dependência ao número atômico do material, uma vez que, maior número atômico, maior

densidade eletrônica do meio. Em seções posteriores, será discutido o conceito de Transferência Linear de Energia (LET), que, para o caso de partículas carregadas, está diretamente ligado ao seu poder de freamento eletrônico, mas não nuclear (PODGORSK; SERVICE, 2010).

O poder de freamento ainda é dividido em duas categorias principais: poder de freamento colisional e poder de freamento nuclear. O primeiro é dominante para partículas com alta energia cinética e está associado à transferência de energia para os elétrons orbitais do material. Por outro lado, o poder de freamento nuclear, também chamado de freamento elástico, é mais significativo em energias mais baixas, quando as partículas interagem elasticamente com os núcleos dos átomos do meio, causando recuo nuclear e perda de energia da partícula incidente.

Uma característica importante observada na curva de poder de freamento para partículas carregadas pesadas, como prótons e partículas alfa, é o pico de Bragg. Esse fenômeno ocorre quando a partícula perde a maior parte de sua energia cinética no final de seu trajeto, resultando em uma alta densidade de ionização próxima ao "ponto de parada" da partícula.

3.2 Detectores

O princípio básico de detecção de radiação nuclear está fundamentado nas interações de radiação com a matéria, como excitação e ionização, que são os principais meios utilizados em técnicas de detecção. A excitação, por exemplo, pode gerar emissão de luz fluorescente, que gera a oportunidade de ser captada por dispositivos sensíveis à luz, como tubos fotomultiplicadores. Já a ionização pode resultar na produção de portadores de carga - íons, elétrons e buracos na camada de valência - entre os eletrodos de um detector, como ocorre em detectores a gás e semicondutores (CHOPPIN et al., 2014, cap . 9).

Dentre os principais tipos de detectores utilizados e seus mecanismos temos:

3.2.1 Detecção por Emulsões Fotográficas

Os detectores de emulsão baseados em tecnologia fotográfica estão entre as tecnologias mais antigas usadas para detectar radiação ionizante. As emulsões são formadas por cristais de haleto de prata em uma solução de gelatina que, ao serem expostas à radiação, sofrem decomposição e formam uma imagem latente. Essa imagem se torna visível apenas durante o processo de revelação, quando o processo químico transforma as áreas irradiadas em registros visíveis. Assim, esse tipo de detector é extremamente útil para obter alta resolução espacial, permitindo capturar até mesmo detalhes de forma precisa. Além da alta resolução, outro benefício deste tipo de detector vêm de sua propriedade de gerar

registros permanentes das interações, permitindo que sejam armazenados e reanalisados posteriormente, caso necessário.

Dentre suas limitações mais relevantes, porém, é a incapacidade de fornecer leituras em tempo real. Além disto, qualidade do registro também pode ser influenciada pela intensidade da radiação. Apesar de, historicamente, este tipo de detector ter desempenhado um papel essencial em diversas áreas das ciências básicas, o surgimento de tecnologias mais modernas, como os detectores eletrônicos, diminuiu seu uso significativamente (CERRITO, 2017).

3.2.2 Detectores Termoluminescentes (TLDs)

Detectores termoluminescentes (TLDs) são dispositivos que baseiam-se na capacidade de certos materiais cristalinos, como fluoretos de lítio ou cálcio, de armazenar energia na forma de "armadilhas eletrônicas" quando expostos à radiação. Com a interação desta com o material sensível, elétrons da banda de valência são excitados para a banda de condução. Estes elétrons, ao retornarem a estados de menor energia, podem ficar presos em armadilhas relacionadas a defeitos cristalinos. Durante o aquecimento do material, porém, a energia térmica energiza os elétrons o suficiente para se libertarem destas armadilhas, permitindo que retornem ao estado fundamental e liberando luz proporcional à dose de radiação recebida. Para medição, geralmente são utilizadas fotomultiplicadoras para amplificar o sinal luminoso.

Em relação às diversas vantagens deste tipo de dispositivo temos sua alta precisão e capacidade de medir doses acumuladas ao longo do tempo, os tornando eficientes para monitoramento de doses ocupacionais individuais (CERRITO, 2017).

3.2.3 Detectores a Gás

Os detectores de ionização gasosos operam utilizando a interação de partículas carregadas com um gás, gerando cargas livres por ionização primária, gerada pela interação direta de partículas carregadas com o gás, e secundária, causada geralmente por ionizações indiretas que geram elétrons secundários. Ao aplicar um campo elétrico neste meio, as cargas livres passam a se mover em direção aos eletrodos, gerando sinais eletricamente detectáveis (CERRITO, 2017).

O desenvolvimento de detectores gasosos evoluiu de simples câmaras de ionização, em seus diversos formatos, para dispositivos como contadores proporcionais e contadores Geiger-Müller.

O desempenho do detector varia não só conforme a tensão aplicada mas também perante a escolha dos gases de suas câmaras. Em baixas tensões, as cargas recombinaem antes de serem coletadas, tornando o dispositivo ineficaz. Já com tensões mais altas, todas

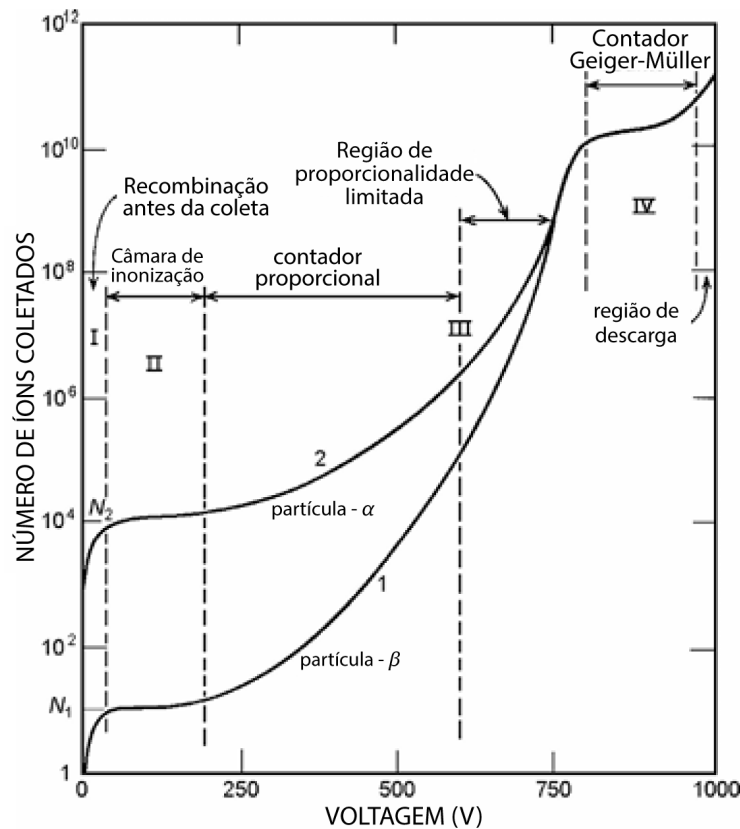


Figura 7 – Número de Ionizações Coletadas a depender da voltagem - Regiões de funcionamento de detectores gasosos

Fonte: (CHOPPIN et al., 2014)

as cargas liberadas são coletadas, e o detector opera como uma câmara de ionização, gerando sinais proporcionais à quantidade de carga coletada. Em tensões ainda maiores, no regime dos contadores proporcionais, os elétrons acelerados próximos ao ânodo causam ionização secundária, gerando amplificação de carga com fatores que podem atingir até 10^6 . Em relação à escolha dos gases, critérios como baixo potencial de ionização, minimização da recombinação de elétrons e supressão de descargas em altas tensões são considerados para uma maior efetividade do detector (CERRITO, 2017).

Podem ainda ser dos tipos pulso ou não-pulso: o primeiro que ao interagir com a radiação gera um pulso de diferença de potencial, formando picos pontuais proporcionais à intensidade de interações e o segundo, que avalia o efeito médio dos eventos devido à um alto número de interações geradas pela radiação, isto, por intervalo de tempo (TAUHATA et al., 2003, p. 165)

Como observado na Figura 7, este tipo de dispositivo é regido por uma curva de funcionamento, à depender da tensão aplicada. Na Região I, os pares de íons formados, após interação de radiação com a matéria, se recombinam antes de atingir os eletrodos, não gerando pulso. Na Região II, todos os pares de íons produzidos são coletados pelos eletrodos, gerando pulsos de amplitude dependentes apenas da energia incidente no dis-

positivo. Na Região III, a aceleração dos íons gerados ionizam outras moléculas do gás, gerando um efeito de ionizações em cascata. Já na Região IV, observa-se um limite de ionizações devido à saturação destes eventos no gás, fazendo com que a quantidade de íons produzidos e coletados se apresentem sempre da mesma ordem de grandeza - propriedade que faz com que esta região seja independente da energia da radiação incidente (TAUHATA et al., 2003, p. 166).

Geiger-Müller

O contador Geiger-Müller (G-M) é um dos detectores de radiação mais conhecidos devido à sua simplicidade, baixo custo e versatilidade. Sua principal característica é gerar pulsos elétricos de saída com amplitude uniforme e detectável, o que os torna eficientes contadores de partículas, mas incapazes de diferenciar energias. Em geral as ionizações de seu gás podem ocorrer tanto por meio de incidência direta de partículas carregadas, quanto por elétrons secundários gerados por radiações gama. Pode-se ainda utilizar este tipo de detector para mensurar a contribuição de diferentes tipos de radiações ionizantes, apenas por inserir absorvedores finos em frente à câmara do detector, bloqueando a passagem de partículas carregadas, e permitindo às de radiações mais penetrantes como a gama.

Além disto, para seu funcionamento, existe a necessidade de um ajuste correto da tensão de operação, que deve estar dentro de uma faixa conhecida como "plateau", como observada na Figura 7. Enquanto em tensões abaixo dessa faixa, os pulsos são inconsistentes e pouco confiáveis, em tensões excessivas podem levar a uma descarga contínua, danificando o dispositivo.

Este tipo de detector também possui limitações como o 'tempo morto' - intervalo necessário para que o dispositivo se recupere após registrar um evento. Durante altas taxas de contagem, pode ocorrer uma falta de registro de eventos, gerando medições não precisas (SHAPIRO, 2002, p. 252 - 255).

Outra grande vantagem deste tipo de detector, e, um de seus maiores motivos para popularidade é o fato de que podem ser calibrados para medir grandezas como dose e exposição, utilizando técnicas específicas de instrumentação e metrologia. Normalmente, uma calibração, de fábrica, pode ser realizada para uma energia específica - como a emitida por fontes de Cobalto-60 ou Césio-137 - permitindo o cálculo dessas grandezas com base na fluência da radiação (TAUHATA et al., 2003, p. 170).

Câmaras de Ionização

Este é um dos detectores mais simples, operando com um recipiente preenchido com gás, frequentemente ar. A coleta de íons é realizada aplicando-se uma diferença de potencial entre a parede da câmara e um eletrodo interno, produzindo uma corrente de ionização contínua que pode ser medida por um eletrômetro sensível e exigindo amplifica-

dores. Além disto, operam idealmente em tensões até 250 V, região II, produzindo pulsos independente da diferença de potencial aplicada mas proporcional à energia irradiada no dispositivo (TAUHATA et al., 2003).

A corrente resultante é proporcional à taxa de dose medida no gás, sendo expressa em termos de exposição (C/kg) no caso de radiação X e gama, amplamente utilizada como 1 R correspondendo aproximadamente a uma dose de 0,01 Gy em tecido mole. Esses dispositivos, geralmente cilíndricos, podem ter sua sensibilidade aumentada ao pressurizar o gás no interior da câmara.

Instrumentos portáteis baseados em câmaras de ionização, projetados para medir taxas de exposição da ordem de miliröntgens por hora (mR/h), são úteis para monitoramento de áreas de trabalho (SHAPIRO, 2002, p.284).

Geralmente, este tipo de dispositivo é calibrado com feixes de raios gama provenientes de fontes de césio ou rádio, utilizando-se de sua geometria para medição. Para aplicações precisas em energias médias e altas, é necessário considerar também correções adicionais, como linearidade da escala, temperatura e pressão do ar, bem como dependência angular, também podem ser necessárias para garantir a precisão das medições (GIBBONS; KHAN, 2014).

3.2.4 Detectores por Cintilação

Detectores de cintilação operam utilizando um fenômeno físico chamado cintilação, onde materiais específicos emitem luz ao serem expostos à radiação ionizante. Essas interações transferem energia da radiação incidente para os elétrons no material, excitando-os para estados de energia mais elevados. Ao retornar ao estado fundamental, liberam energia em forma de fótons. O número de fótons produzidos é proporcional à energia depositada pela radiação ionizante, o que permite que detectores de cintilação forneçam informações quantitativas sobre a energia da radiação incidente. O tipo e a intensidade dessas interações também dependem diretamente das propriedades, tanto da radiação quanto do material cintilador, incluindo fatores como número atômico, densidade e estrutura cristalina (TAUHATA et al., 2003; GIBBONS; KHAN, 2014).

A luz de cintilação gerada no material deve então ser eficientemente coletada e convertida em um sinal elétrico para análise posterior. Para isso, a luz é direcionada para um dispositivo fotossensível, como um tubo fotomultiplicador. Após a conversão em um sinal elétrico, a saída é processada por circuitos eletrônicos que medem propriedades como intensidade, tempo e energia. A intensidade da luz de cintilação é diretamente proporcional à energia da radiação absorvida, permitindo que o detector meça a deposição de energia.

Fisicamente, a eficácia de um detector de cintilação depende de várias propriedades do material que é constituído, além de ter sobrevida aumentada em caso de encapsula-

mento. O material cintilador deve ter um alto rendimento luminoso para produzir fótons suficientes para detecção, bem como um tempo de decaimento rápido para permitir a medição rápida de eventos de radiação sucessivos. A escolha do material também determina a faixa de tipos de radiação detectáveis. Por exemplo, materiais de alta densidade são mais adequados para a detecção de raios gama devido à maior probabilidade de interações por meio de processos como absorção fotoelétrica e espalhamento Compton (CERRITO, 2017).

Detectores Semicondutores

Estes tipos de detector operam com base em materiais semicondutores - como o silício (Si) e o germânio (Ge) - que apresentam propriedades específicas para converter radiação em sinais elétricos mensuráveis. Quando partículas ou fótons atravessam o detector, ocorre a transferência de energia para seu material de constituição, gerando pares elétron-buraco. Esses pares são formados quando a energia incidente excita elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando lacunas em seu sítio original. Em seguida, um campo elétrico aplicado ao semicondutor direciona os elétrons para o ânodo e buracos - que podem se comportar como cargas positivas, se movimentando de átomo em átomo em materiais semicondutores - para o cátodo, criando uma corrente elétrica proporcional à energia depositada pela radiação.

Os detectores semicondutores são valorizados por sua alta resolução energética, que permite distinguir entre diferentes energias de radiação com grande precisão. Outra vantagem é a capacidade de operação em tempo real, possibilitando medições rápidas e dinâmicas, especialmente em aplicações médicas, industriais e de segurança.

No entanto, existem desafios associados ao uso de detectores semicondutores. Eles requerem uma operação em ambientes com ruído eletrônico mínimo e, em alguns casos, como no germânio, precisam ser resfriados a temperaturas criogênicas para reduzir o ruído térmico e manter a eficiência. Além disso, os custos de fabricação podem ser consideravelmente elevados (CERRITO, 2017).

3.3 Radiobiologia e Efeitos Biológicos da Radiação

A radiação ionizante, ao interagir com sistemas biológicos, pode causar uma ampla variedade de efeitos, que variam de alterações em moléculas isoladas a danos em tecidos e organismos por completo. Esses efeitos decorrem principalmente como resultado da formação de espécies químicas reativas, radicais livres, seja por excitação ou ionização de átomos e moléculas.

Em níveis celulares, a radiação pode levar a quebras no DNA, mutações genéticas e morte celular. Estudos recentes, como os expostos pelo Volume III, anexo C (UNSCEAR,

2008), vem cada vez mais contribuindo para evidências de desenvolvimento de doenças como o câncer. A extensão dos efeitos biológicos depende de fatores como o tipo e a energia da radiação, a dose absorvida e a sensibilidade do tecido ou organismo exposto, termos que iremos discutir com maior profundidade nas seções a seguir.

Em baixas doses, a radiação pode causar danos subletais, sendo passíveis de sofrer reparação celular, mas exposições prolongadas ou altas doses podem resultar em como necrose tecidual, falência de órgãos ou efeitos hereditários devido a mutações germinativas.

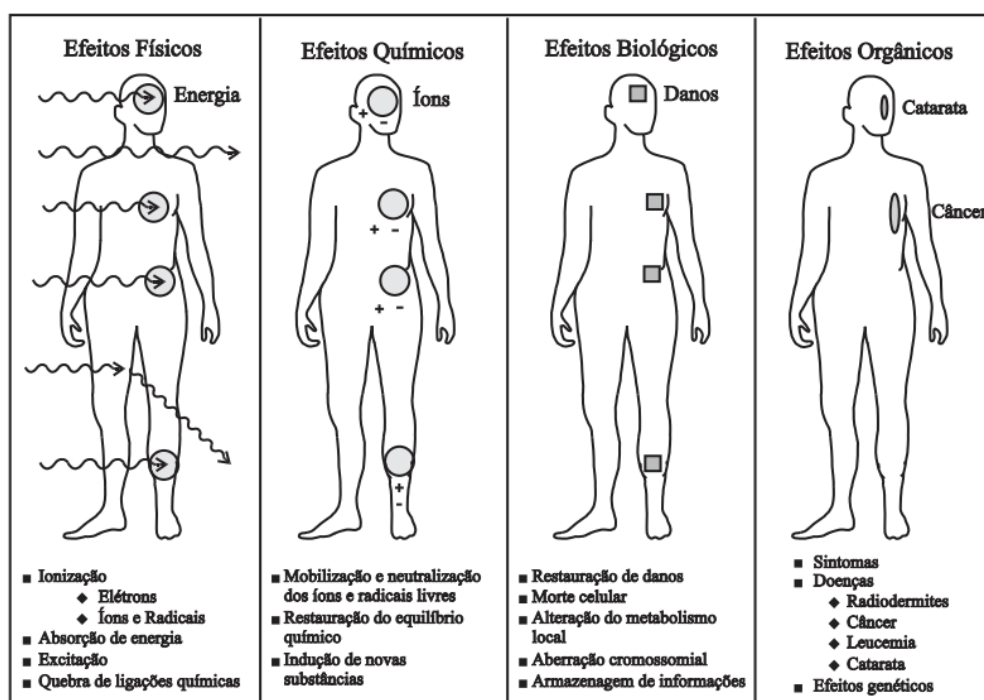


Figura 8 – Etapas de efeitos de interação da radiação com sistemas biológicos

Fonte: (TAUHATA et al., 2003, p. 122)

Os efeitos gerados pela radiação seguem um fluxo de acontecimento, como demonstrado pela Figura 8, sendo compostos por uma etapa física, química, biológica, e, por fim, orgânica. Os mecanismos de cada uma destas etapas será melhor detalhado nas Seções 3.3.3 e 3.3.4. Além disso, os efeitos podem ser classificados como determinísticos, quando há um limiar de dose acima do qual os danos se manifestam fisicamente, como queimaduras por radiação, ou estocásticos, que ocorrem sem um limiar definido, mas com probabilidade aumentada com a dose (BAATOUT, 2023).

3.3.1 Transferência de Energia Linear (LET)

A Transferência de Energia Linear (Linear Energy Transfer, LET) é uma medida de quantidade de energia que uma partícula, ionizante transfere por unidade de comprimento de sua trajetória em um material. LET é geralmente expressa em unidades de $keV/\mu m$,

e está diretamente relacionada ao tipo e à severidade dos danos biológicos causados pela radiação ionizante em tecidos vivos, uma vez que diferentes radiações, de diferentes LET, depositam energia no tecido de forma distinta.

A um exemplo, radiações de alta LET, como partículas alfa, tendem a transferir energia em pequenos volumes, criando lesões concentradas, como quebras de dupla hélice no DNA, estas, que são mais difíceis de reparar e portanto, mais prováveis de levar a consequências biológicas severas.

Por outro lado, radiações de baixa LET, como partículas beta, raios X e gama, distribuem a energia de forma mais dispersa, resultando em danos menos concentrados e frequentemente mais passíveis de reparação celular. Assim nasce uma noção de densidade de ionização independente do conceito de poder de penetração da radiação (ATTIX, 2008).

Como Tauhata et al. (2003, p.111-112) comenta, radiações do tipo eletromagnéticas só são incluídas como baixo LET após sua primeira interação com a matéria, seja por efeito fotoelétrico, Compton ou outra variação. Até este evento, este tipo de radiação passa pelo meio sem causar maiores efeitos.

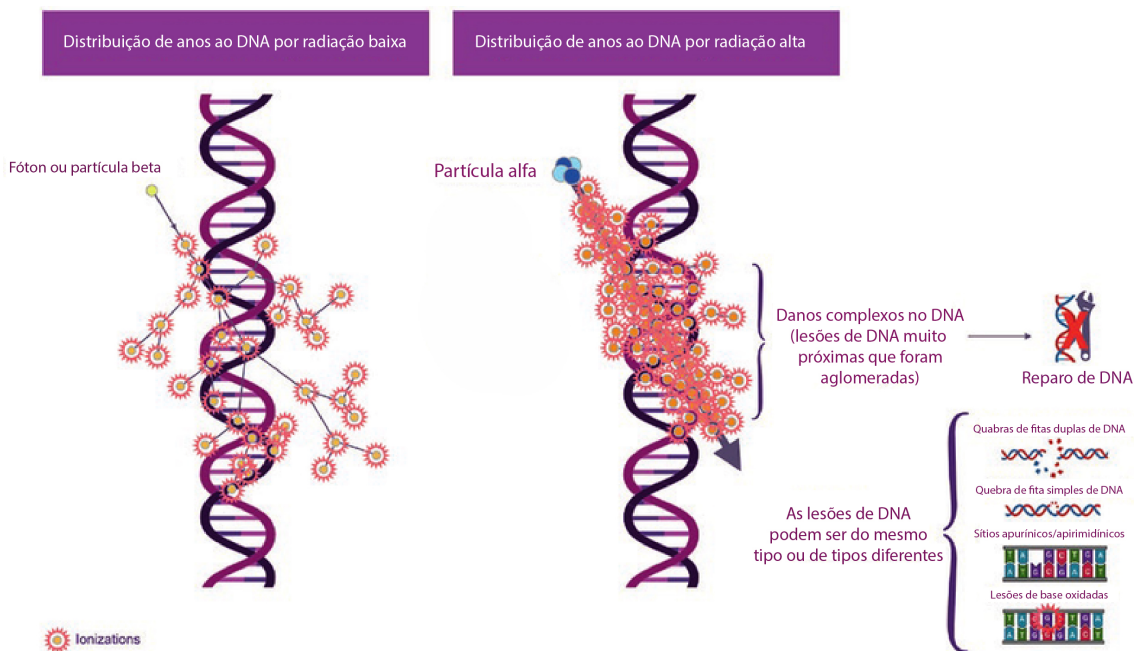


Figura 9 – Esquemática de representação de efeitos gerados por radiações de LET alto e baixo

Fonte: (LOURENÇO et al., 2023)

Do ponto de vista biológico, LET diretamente influencia a chamada Efetividade Biológica Relativa (RBE), que compara a eficácia de diferentes tipos de radiação na indução de um mesmo efeito biológico. Uma radiação com alto LET, geralmente, se apresenta mais eficaz em causar danos celulares e teciduais para uma mesma dose absorvida, e conseqüentemente, também gera uma menor sobrevivência celular para esta mesma dose,

ilustrada pelo gráfico 10.

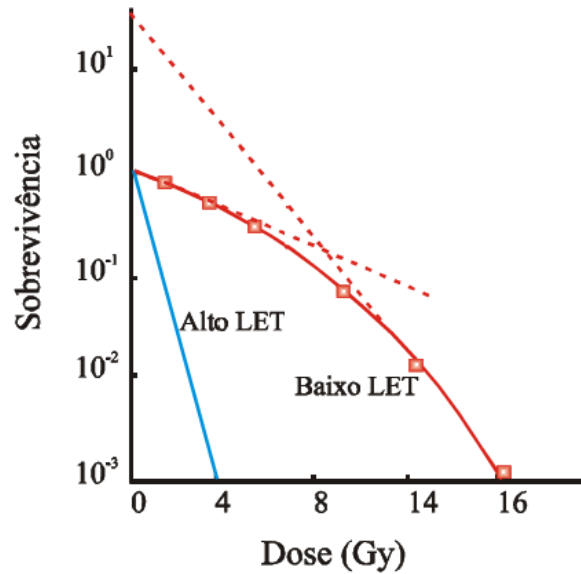


Figura 10 – Comportamento de taxas de sobrevivência celular em mamíferos, em função da dose para radiações de alto e baixo LET

Fonte: (TAUHATA et al., 2003, p.104)

Esta transferência de energia e sua densidade é responsável por desencadear os efeitos físicos, geralmente os primeiros a ocorrer após a interação da radiação com a matéria, causando a ionização e excitação de átomos. Como resultado, são observados a formação de elétrons livres, íons reativos e estados excitados das moléculas, desencadeando a etapa de efeitos químicos a ser discutida posteriormente neste estudo.

Uma diferenciação importante de se perceber é a que se encontra entre LET e poder de freamento, o Stopping Power, de um meio. Enquanto, para LET, a definição se restringe apenas a energias transmitidas e geração de ionizações ao meio localmente, a definição física de poder de freamento trata-se de um conceito geral, voltando-se muito mais a uma análise de poder de penetração e alcance - enfoque nos acontecimentos com a partícula, e não os efeitos gerados pela passagem desta (OKUNO; YOSHIMURA, 2016). De forma geral, apesar de serem descritas aparentemente por uma mesma equação:

$$S = \frac{dE_{\text{perdida}}}{dx} \quad (3.10)$$

$$L = \frac{dE_{\text{depositada}}}{dx} \quad (3.11)$$

Com as equações 3.10 e 3.11 se referindo à poder de freamento e LET respectivamente, dE_{perdida} se referindo à energia perdida pela partícula e $dE_{\text{depositada}}$ a energia depositada e absorvida pelo meio (CHOPPIN et al., 2014).

Surgem ainda, definições de LET restrito, representado sem índice ou irrestrito, LET_{∞} , representado com índice de infinito. O LET_{∞} considera toda a energia transferida ao meio, enquanto o LET restrito se concentra na energia que resulta em ionizações locais. No caso do LET irrestrito, para grandes volumes, se iguala em módulo ao valor de poder de parada eletrônico, uma vez que, em média, toda energia perdida pelas partículas incidentes também é depositadas no meio em que elas estão incidindo (BAATOUT, 2023, p. 54). Além disto, serve como variável para a função do fator de qualidade Q de radiação, definido pela ICRP. Apesar de não mais utilizado diretamente para cálculo do fator peso da radiação, ainda é utilizado em equivalentes de dose operacionais, grandeza que será explorada na seção 3.7 posteriormente neste estudo (ICRP, 2007, p.30).

Os efeitos do LET também são modulados por fatores como a presença de oxigênio nos tecidos, que aumenta a radiosensibilidade devido a sua capacidade de estabilizar os radicais livres reativos (ROS) gerados pela radiação, amplificando os danos ao DNA por impedir seu reparo. Esse fenômeno, conhecido como Efeito de Melhora pela Presença de Oxigênio (Oxygen Enhancement Ratio - OER), é mais pronunciado em radiações de baixo LET devido à sua propriedade de produção de danos menos concentrados. Radiações de alta LET tendem a ser menos influenciadas pelo OER, devido à sua alta densidade de ionização, que já induz danos letais mesmo em condições de baixa oxigenação.

O conceito de LET também foi essencial para o ICRP adotar a nova definição e novo cálculo do fator peso w_R presente na Dose Equivalente, onde relaciona o tipo de radiação e a amplitude de seus efeitos biológicos.

3.3.2 Eficácia Biológica Relativa (RBE)

A Eficácia Biológica Relativa (Relative Biological Effectiveness, RBE) é referente à capacidade de uma radiação ionizante específica em produzir efeitos biológicos comparada a uma radiação de referência. É amplamente empregada para avaliar e quantificar os impactos biológicos das radiações em diferentes tipos de tecidos ou organismos, especialmente em contextos médicos e na proteção radiológica.

O valor da RBE depende, intrinsecamente de diversos fatores, incluindo o conceito de qualidade da radiação, o tipo de célula ou tecido em questão e o final biológico considerado, como morte celular, mutação ou dano ao DNA. Radiações de alta LET, como partículas alfa e nêutrons rápidos, geralmente apresentam maior RBE em comparação com radiações de baixa LET, como raios-X e raios gama.

A RBE é definida pela equação:

$$RBE = \frac{D_{\text{ref}}}{D_{\text{teste}}} \quad (3.12)$$

Onde D_{ref} é a dose da radiação de referência necessária para produzir um efeito biológico específico e D_{teste} é a dose da radiação em estudo necessária para produzir o mesmo efeito biológico. Tipicamente, a dose de referência se baseia em no valor de 250 kVp energia de raios-X, porém, mais recentemente, à uma tendência de se usar o valor de 1 MeV, devido a ser a energia emitida pelo Co-60 (SUREKA; ARMPILIA, 2017; BAATOUT, 2023).

Além disso, o tempo de exposição e a divisão da dose em frações alteram significativamente a RBE, permitindo o ajuste de limites de exposição ocupacional e pública (ICRP, 2007). A fração da dose permite reparos celulares entre as exposições, geralmente reduzindo a RBE para radiações de baixa LET.

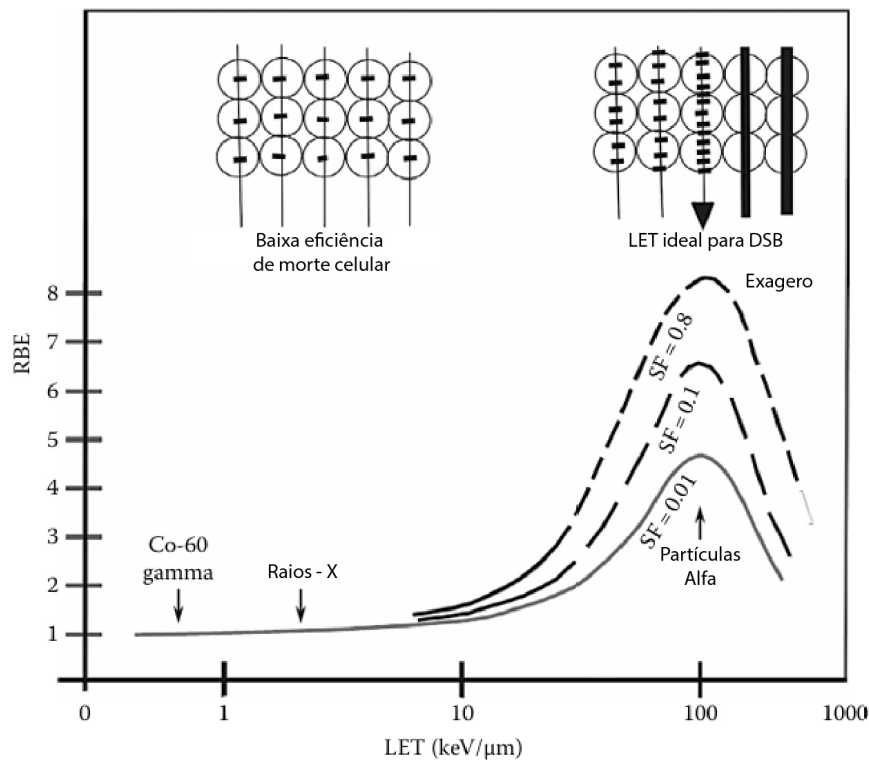


Figura 11 – Eficácia Biológica Relativa em função da LET, considerando ainda a taxa de sobrevivência celular

Fonte: (SUREKA; ARMPILIA, 2017, p. 83)

O gráfico 11 descreve o comportamento da RBE em função da LET e taxa de sobrevivência celular. É importante perceber que a RBE cresce para baixas doses, sendo, como definida na equação 3.12, inversamente proporcional à dose de referência. Quanto menor a dose, maior a taxa de sobrevivência celular. A partir de certo valor de LET, porém, a densidade de ionização é tão acentuada que parte da energia transferida ao meio é "desperdiçada", gerando a decadência de efetividade biológica.

3.3.3 Efeitos da Radiação: Uma Perspectiva Molecular

Os Danos ao DNA

Os danos ao DNA representam o impacto mais significativo da exposição à radiação, dado o papel central dessa molécula na manutenção da estabilidade celular. O ácido desoxirribonucleico (DNA) é composto por duas fitas antiparalelas - compostas por nucleotídeos que se conectam entre si por pontes de hidrogênio. Enquanto quebras de fita simples (SSBs), que são geralmente reparadas eficientemente, quebras de fita dupla (DSBs), apresentam maior complexidade e risco de causar mutações ou morte celular. Além disso, os processos oxidativos às bases nitrogenadas podem levar a alterações estruturais que comprometem a replicação e a transcrição.

Outro tipo crítico de dano são os chamados "crosslinks", que envolvem ligações anormais entre cadeias complementares de DNA ou entre DNA e proteínas, bloqueando processos celulares essenciais (CHOPPIN *et al.*, 2014).

A Interação da Radiação com Tecidos Biológicos

Ocorre em quatro estágios sequenciais: físico, físico-químico, químico e biológico. Além destas etapas, também possui dois mecanismos principais de ação sobre a matéria: ação direta e indireta, ilustrada pela esquemática da Figura 12 (BAATOUT, 2023).

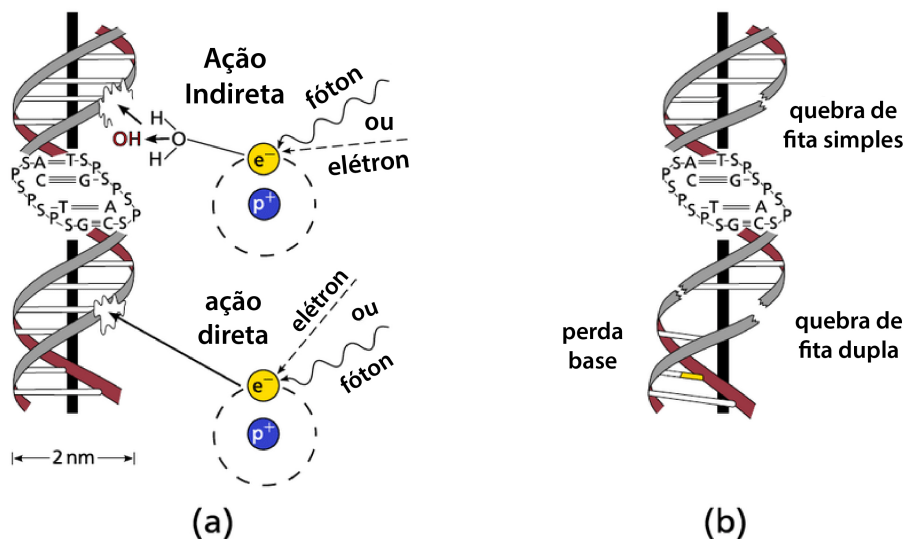


Figura 12 – Esquemática de ação direta e indireta da radiação no DNA

Fonte: (MÜSSIG, 2013)

Na etapa física, se tratando do mecanismo de ação direta, a energia é depositada diretamente nas moléculas-alvo, como o DNA, provocando ionização e excitação dos átomos constituintes. Este mecanismo é mais comumente observado em radiações de alta densidade linear de energia (LET) devido sua característica colisional de causar danos

localizados e, frequentemente, irreparáveis, como observado na Figura 9. Temos então uma transição rápida do estado físico-químico, com a molécula de DNA ionizada, para o estado químico, onde se consolida os danos ou a quebra da fita, a voltando para uma forma quimicamente estável, mesmo que danificada.

Já na ação indireta, o dano na fita é causado devido à formação de espécies intermediárias. É comumente observado em radiações de baixo LET, devida a sua menor densidade de ionização, fazendo com que, por se deparar com um ambiente majoritariamente composto de moléculas de H_2O , gere em uma etapa físico-química, por radiólise, uma formação de íons como H_2O^+ e e^- (AGENCY, 2010).

Ao prosseguir para uma etapa química, estes íons, entrando em contato com um meio bem oxigenado, vem a ser tornar espécies reativas de oxigênio (ROS) - como o radical hidroxila - OH^+ ou OH^- - e o peróxido de hidrogênio H_2O_2 . Essas moléculas altamente reativas, tem capacidade de se conectar à ligações insaturadas das bases nitrogenadas, componente primordial do DNA. Mecanismos antioxidantes do sistema biológico ainda protegem o DNA, reagindo rapidamente com os radicais livres gerados, porém, quando sua quantidade se torna menor que as espécies reagentes, são observados os danos exacerbados da radiação no código genético (CHOPPIN et al., 2014). Os efeitos indiretos representam cerca de dois terços dos danos induzidos por radiação de baixo LET (BAATOUT, 2023).

Temos portanto, que, em geral, células bem oxigenadas apresentam maior suscetibilidade aos danos causados pela radiação em comparação a células hipóxicas ou anóxicas, com pouco ou nenhuma presença de oxigenação.

3.3.4 Efeitos da Radiação: Uma Perspectiva Celular

Nesta etapa biológica, a resposta celular aos danos causados pela radiação é amplamente influenciada pela fase do ciclo celular, o que caracteriza, conseqüentemente, a extensão e gravidade dos efeitos biológicos gerados.

Durante a fase G1, a célula está em preparação para a replicação do DNA, com intensa síntese de RNA e proteínas. Nesta fase, o DNA está em estado de fita simples, e os mecanismos de reparo de danos, como a reparação por remoção de bases danificadas, estão plenamente ativos. Embora a célula ainda seja radiosensível nesta fase, ela apresenta uma alta capacidade reconstruir quebras de fita simples. De qualquer forma, danos extensos podem ainda ser percebidos no "checkpoint" celular da referida fase, acabando por resultar em interrupção do ciclo ou apoptose (BAATOUT, 2023).

Em seu livro, Hall e Giaccia (2018, p.133) discute e define a noção de genes de "checkpoint" genético, onde podem atrasar ou até mesmo interromper o ciclo celular, a depender do entre fases em que esse checkpoint se encontra e dos danos ao DNA identificado.

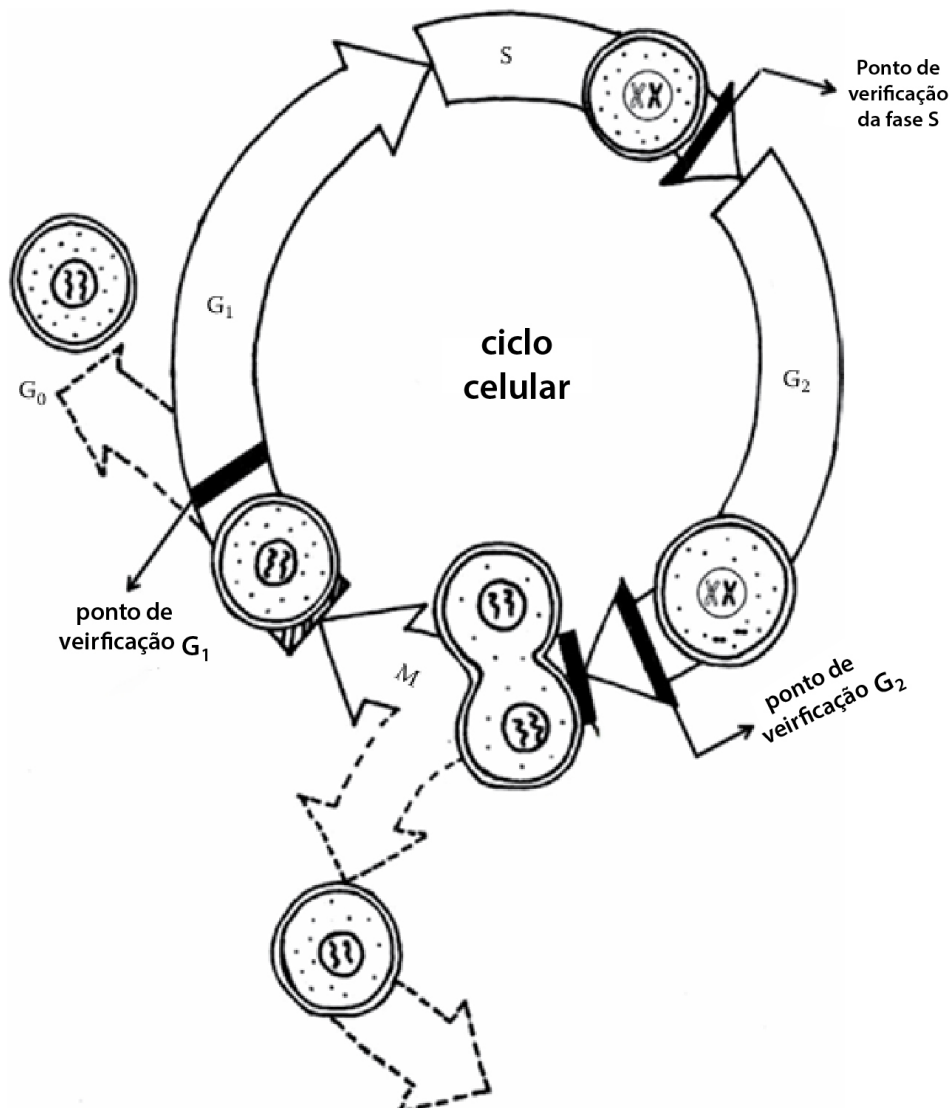


Figura 13 – Esquemática de ciclo celular e seus checkpoints

Fonte: (SUREKA; ARMPILIA, 2017, p.63)

A fase S, que segue após a fase G1, é referente à etapa de replicação do DNA. Durante esse processo, as lesões não reparadas no DNA podem ser incorporadas às novas fitas, resultando em mutações fixadas no genoma. Apesar disso, a fase S é caracterizada por ser brevemente radorresistente, já que, naturalmente, possui mecanismos robustos para corrigir erros durante a replicação.

A recombinação homóloga (HR) é particularmente ativa nesta fase, permitindo o reparo preciso de quebras de fita dupla. Ainda assim, a presença de 'clusters' - aglomerados - de dano, típicos de radiações de LET alto, pode superar as capacidades de reparo, resultando em aberrações cromossômicas (WILSON, 2004).

A fase G2 é marcada por uma preparação final para a divisão celular, com verificações rigorosas em relação à integridade do DNA. Nesta fase, a célula exibe uma elevada

sensibilidade à radiação, devido à exposição do DNA em um estado parcialmente condensado, tornando-o mais vulnerável a quebras em "clusters". Os checkpoints moleculares desta fase avaliam os danos em cromossomos, de forma a que possam ser reparados antes da divisão celular. Em células doentes, ao qual o próprio gene de checkpoint tenha sido danificado por efeitos da radiação, o reparo não é concluído, e a célula entra em mitose com cromossomos danificados (HALL; GIACCIA, 2018, p.133).

A mitose (fase M) é o ponto culminante do ciclo celular, onde ocorre a separação dos cromossomos para células-filhas. Durante esta fase, o DNA está altamente condensado em sua forma cromossômica, o que acaba por, mesmo detectando danos, limitar o acesso das proteínas envolvidas nos mecanismos de reparo. Além disto, os "checkpoints" nesta fase são voltados para o processo de divisão cromossômica em si. Consequentemente, a mitose é a fase mais sensível à radiação e incapacidade de reparar danos durante seu processo também pode desencadear pontos de controle que levam à apoptose pós-mitótica (PAWLIK; KEYOMARSI, 2004).

As fases G2 e M são particularmente vulneráveis, pois o DNA se encontra altamente condensado, não só os mecanismos de reparo são menos eficazes mas também sofrem mais com radiações de maior densidade de ionização.

Comentando brevemente sobre os mecanismos de reparo de DNA, como ilustrado na Figura 14, se incluem a reparação por excisão de bases (BER), que corrige danos menores em fitas simples, a recombinação homóloga (HR) - mecanismo para recuperação preciso de fitas duplas, apesar de dependente da etapa do ciclo celular - e a junção não homóloga de extremidades (NHEJ) - que é independente do da fase, mas menos precisa, geralmente ainda deixando a sequência original comprometida (WILSON, 2004).

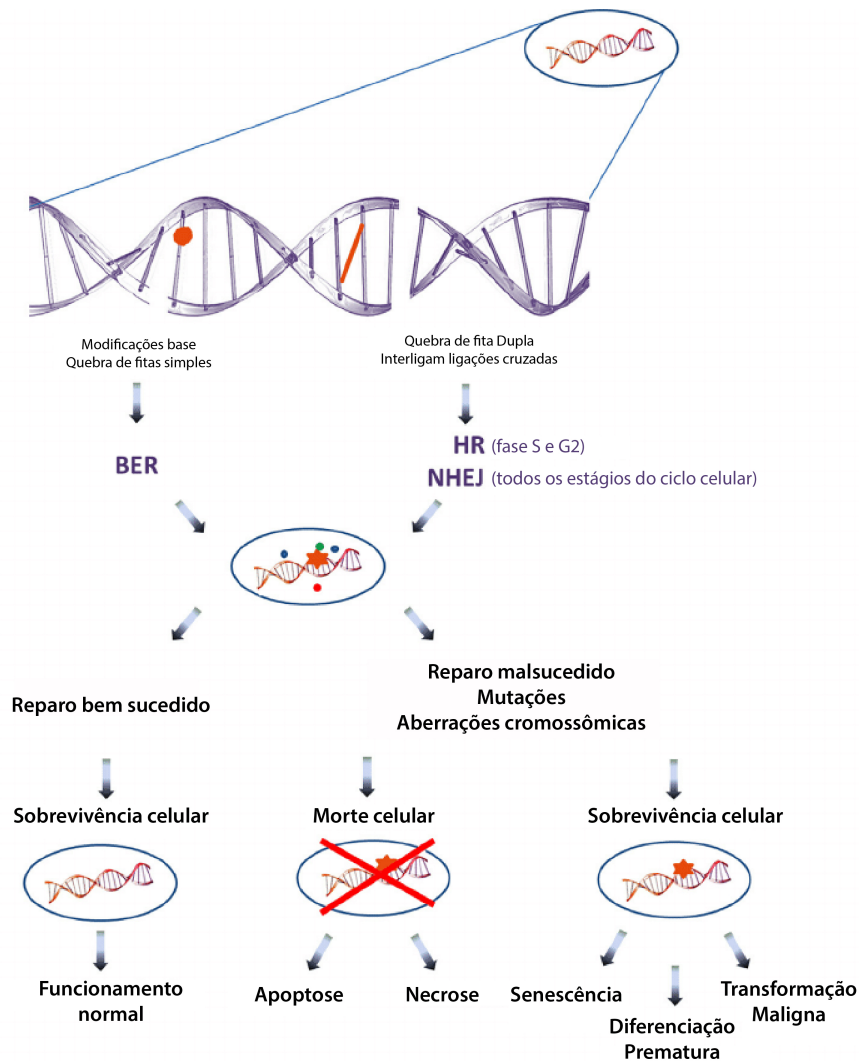


Figura 14 – Trilha celular após dano ao DNA, a depender da forma de reparo

Fonte: (ARENA et al., 2014)

A Lei de Bergonie

A alta radiosensibilidade da fase mitótica é base para uma das leis mais famosas da radiobiologia, a Lei de Bergonie and Tribondeau, que vem em sua primeira aparição em 1906.

Essa lei define que células pouco diferenciadas, com altas taxas de divisão ou com maior tempo em fase mitótica geralmente tendem a sofrer maiores colaterais devido a radiação. Isto, não só por possuir sistemas de reparo menos eficientes em comparação às células mais diferenciadas, mas também por comumente terem maior atividade metabólica, o que aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio, aplicando os danos sofridos.

A Morte Celular

A morte celular induzida por radiação envolve diversos mecanismos que dependem do tipo, intensidade e duração da exposição à radiação. Dentre seus principais meios de morte celular temos:

Apoptose: Trata-se de um caminho de morte celular programada que, apesar de poder ocorrer de forma natural, também pode ser induzida por efeitos gerados pela radiação. Este processo é mediado pela proteína supressora que desencadeia uma cascata de eventos morfológicos que leva à "desmontagem" celular, apesar de não gerar uma resposta inflamatória. Esta forma de morte é especialmente predominante em células linfoides e hematopoiéticas, mesmo após baixas doses de radiação (HALL; GIACCIA, 2012, p.27).

Necrose: Diferente da apoptose, a necrose é uma morte celular descontrolada resultante de lesões celulares agudas, geralmente, apresentando resposta inflamatória. A radiação induz esse processo ao gerar espécies reativas de oxigênio - que podem reagir com lipídeos e proteínas integrantes da célula -, resultando na perda da integridade da membrana celular e seu rompimento. Este fenômeno é mais comum em exposições de altas taxas de dose (SUREKA; ARMPILIA, 2017, p.64-65).

Catástrofe Mitótica: A catástrofe mitótica ocorre durante ou após uma mitose anormal, onde houve tentativa de divisão apesar de danos severos ao DNA. A falha nos pontos de verificação mitótica leva à segregação cromossômica aberrante e à morte celular subsequente por apoptose (SUREKA; ARMPILIA, 2017, p.64-65).

Autofagia: A radiação pode também desencadear a autofagia, um processo celular onde organelas danificadas são degradadas e recicladas. Embora inicialmente seja um mecanismo protetor, fornecendo meios energéticos digerindo suas próprias organelas, sua ativação excessiva pode levar à morte celular autofágica, especialmente em condições de estresse induzidas pela radiação (HALL; GIACCIA, 2018, p.101-102).

3.3.5 Efeitos Determinísticos e Efeitos Estocásticos

Dos efeitos da radiação ionizante sobre o corpo humano, podem ser classificados dois tipos principais: efeitos determinísticos e efeitos estocásticos.

Efeitos determinísticos, mais recentemente chamados de "reação de tecidos" por Clement e Protection (2012, p. 19), ocorrem quando a exposição à radiação ultrapassa um determinado limiar, "threshold", de dose. Acima desse limiar, a gravidade do efeito aumenta à medida que a dose recebida também aumenta. Isto acaba por resultar na morte ou disfunção de um número significativo de células em um tecido ou órgão. Em termos práticos, isto significa que, uma vez atingido o ponto referente ao limiar, quanto maior a dose de radiação, mais grave será o efeito. Geralmente possuem um período de latência curto, ou seja, se manifestam em dias ou semanas após a exposição, e estão frequentemente

associados a acidentes radioativos ou a tratamentos de radioterapia (HALL; GIACCIA, 2018, p. 259).

Por sua vez, os efeitos estocásticos surgem devido à transformação não letal de células individuais, que acabam sobrevivendo a exposição. Ao contrário dos efeitos determinísticos, esses não possuem um limiar claro de dose, como podemos observar na Figura 15. Qualquer quantidade de radiação, mesmo em doses muito baixas, pode teoricamente causar um efeito estocástico, embora a probabilidade de ocorrência seja, hipoteticamente, baixa para pequenas doses. Neste caso, a gravidade das reações não depende da dose recebida, mas a probabilidade de ocorrência depende diretamente ao aumento de dose (ICRP, 2007, p. 49-55).

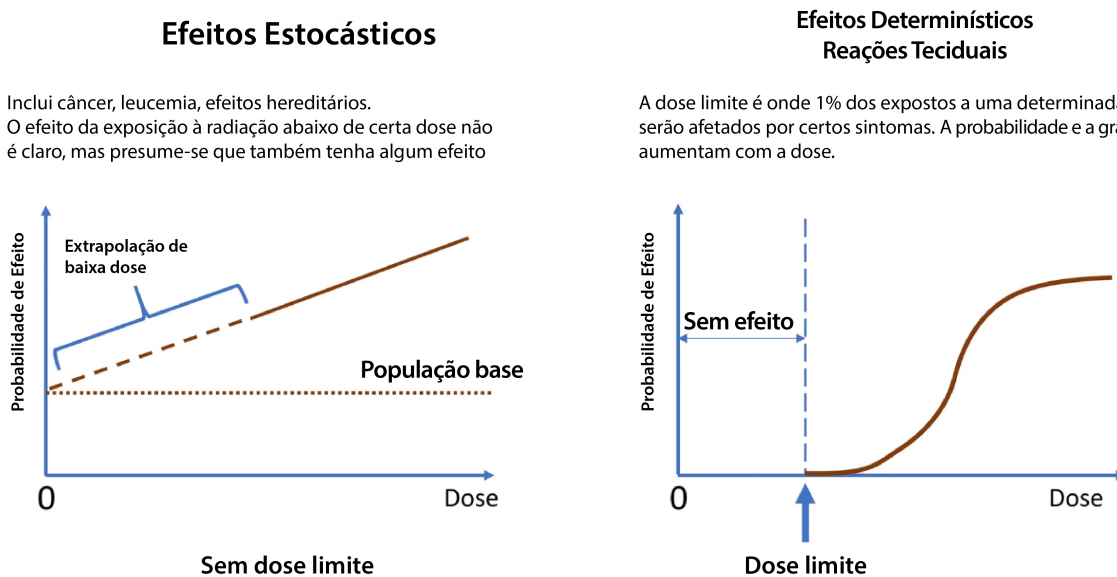


Figura 15 – Curva de efeitos estocásticos, à esquerda, vs curva de efeitos determinísticos, à direita

Fonte: Mainprize et al. (2023)

O modelo mais usado para entender os efeitos estocásticos é chamado, em tradução livre, modelo linear sem limiar (LNT), que assume que a probabilidade de um efeito estocástico aumenta de forma linear com a dose, sem que exista um limiar no qual não há risco. Este modelo, apesar de amplamente utilizado, apresenta incertezas em doses iguais ou menores que 100mSv, (ICRP, 2007, p. 50), o que acaba por gerar discordância sobre seu uso (VAISERMAN et al., 2018). Este debate será aprofundado na seção 3.3.6.

Enquanto os efeitos determinísticos são explícitos em relação à adoção de limites de dose, impedindo que seu limiar seja atingido, os efeitos estocásticos requerem uma minimização da exposição à radiação em geral. Mesmo em doses muito baixas, não há, comprovadamente, um intervalo completamente livre de risco. Evidencia-se mais uma das razões a se considerar a aplicação dos pilares principais da radioproteção.

3.3.6 Efeitos de Radiação de Baixas Doses

Os efeitos de radiações em doses baixas são uma área de intenso estudo e debate na radiobiologia. Dentre as principais preocupações, existem, como centro do problema, os próprios efeitos estocásticos - como câncer e mutações genéticas, que são teorizados de ocorrer mesmo em níveis baixos de exposição e em longo prazo (AGENCY, 2010).

É de conhecimento geral que, mesmo baixas doses de radiação podem causar quebras simples e duplas na fita de DNA, bem como danos às bases nitrogenadas. Embora muitas dessas lesões sejam reparadas por mecanismos celulares, alguns danos podem persistir ou serem reparados incorretamente, levando à instabilidade genômica e, potencialmente, ao desenvolvimento de câncer.

Outro aspecto relevante é o chamado "efeito espectador" (bystander effect), em que células não diretamente irradiadas também exibem sinais de dano devido à comunicação com células que foram irradiadas. Este fenômeno pode amplificar o efeito de baixas doses de radiação, estendendo o impacto para além das células diretamente afetadas (SUREKA; ARMPILIA, 2017, p. 86).

Dentre uma das maiores amostras de estudo para a determinação dos efeitos da radiação ionizante na saúde, temos os sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki. De acordo com o relatório BEIR VII, NRC (2006), estima-se que aproximadamente 65% desses sobreviventes foram expostos a doses baixas de radiação, definidas como inferiores a 100 mSv, o que permite até os dias atuais, a observação e levantamento de efeitos estocásticos.

A partir desses resultados e de dados epidemiológicos em geral, sugeriu-se que a relação dose-resposta LNT poderia ser extrapolada, indicando que os riscos em doses baixas ou taxas de dose reduzidas seriam proporcionais àqueles inferidos para danos de potencial cancerígeno. Contudo, em 2018, uma revisão de estudos humanos realizada pelo Conselho Nacional de Proteção e Medição de Radiação (NCRP) sugeriu que não haveria evidências suficientes para tal afirmação (ICRP, 2021, p. 23).

A maior parte dos comitês - UNSCEAR, ICRP, IAEA e NCRP acabam por adotar uma abordagem neutra sobre a questão, não considerando como um fato comprovado cientificamente, mas julgando um limiar prudente para meios de proteção radiológica (HALL; GIACCIA, 2018, p. 286). Discussões sobre o modelo surgiram desde seu primórdio, ao levar em consideração os custos sociais e econômicos associados a medidas consideradas, por muitos, excessivamente rigorosas (VAISERMAN et al., 2018).

Investigações modernas, porém, vem sugerindo que a exposição a baixas doses de radiação pode ativar mecanismos de reparo celular e respostas imunes, compensando ou até reduzindo danos potenciais, um conceito denominado hormese (WAN et al., 2024). Discute-se também como esse tipo de exposição pode engatilhar uma resposta adaptativa

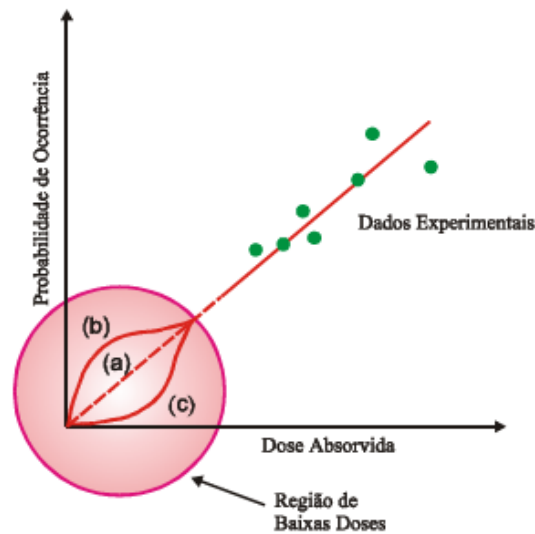


Figura 16 – Modelo de extrapolação de baixas doses e a região de dose de maior concentração de dados epidemiológicos

Fonte: (TAUHATA et al., 2003, p.100)

do organismo contra acúmulo de doses. As principais organizações, porém, rejeitam tal modelo ao comparar com o adotado LNT.

O questionamento do modelo tradicional vêm diretamente sobre a ponderação e amostra dos dados epidemiológicos, que por vezes não abrangem as doses às quais trabalhadores expostos à radiação geralmente estão submetidos.

Em geral, até os dias atuais, não existe um consenso bem definido, apesar de os órgãos principais de diretrizes internacionais optarem por adotar o limiar mais seguro, considerando efeitos probabilísticos de exposição à baixas doses em longos períodos de tempo.

3.3.7 A Radiobiologia no Contexto da Radioproteção

O estudo da radiobiologia é essencial no contexto da radioproteção pois fornece a base científica crucial para a avaliação e a formulação de estratégias de proteção. A interação da radiação com os tecidos é analisada a partir do nível molecular até o sistêmico, permitindo o desenvolvimento de parâmetros como fatores peso de tecido e de radiação - de acordo com radiosensibilidade e poder destrutivo em sistemas biológicos - fundamentais para cálculo de doses equivalentes e efetivas.

A biologia molecular moderna permitiu avanços significativos na compreensão dos mecanismos de reparo de DNA e das vias de sinalização celular envolvidas, ajudando a diferenciação de efeitos determinísticos - necrose celular - dos estocásticos, mesmo em baixas doses. Além disso, também guia o desenvolvimento de abordagens que consideram os impactos biológicos cumulativos, especialmente para tecidos com alta radiosensibilidade

- como medula óssea e cristalino.

A integração que essa área gera entre física e biologia é essencial para a formulação das grandes normativas internacionais, agindo não só na melhoria de protocolos clínicos mas também atuando no conceito de otimização de exposição à radiação ionizante.

3.4 A Origem das Diretrizes Internacionais

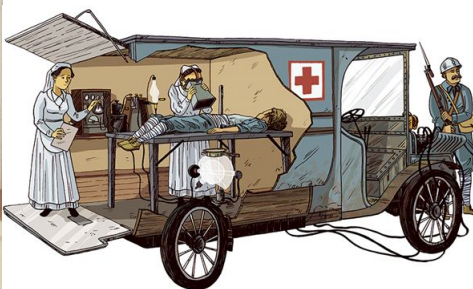
A rápida evolução no entendimento da natureza das radiações radioativas e, consequentemente, o aumento notável de seu uso, veio juntamente à observação de seus efeitos biológicos, a época, não conhecidos mas já teorizados. Thomson (1899) foi um dos primeiros a demonstrar explicitamente a relação entre a exposição a raios-X e seus efeitos adversos, expondo seu dedo, saudável, a um tubo de raios-X durante vários dias consecutivos. O resultado foi o desenvolvimento de eritema, inchaço e dor, confirmando o vínculo entre exposição e lesão.

Em 1901, William Rollins forneceu provas contundentes sobre os efeitos prejudiciais dos raios-X ao relatar a morte de animais cobaias submetidas a longos períodos de exposição (Rollins W., 1901). Com base em suas observações, Rollins foi um dos pioneiros a propôr medidas de proteção - como o uso de óculos opacos à radiação. Infelizmente, suas advertências foram inicialmente consideradas exageradas.

Apenas em meados de 1907, após a morte de diversos operadores de raios-X ter chamado a atenção para os riscos da profissão, foram feitas recomendações sobre a necessidade de treinamento adequado e conhecimento técnico (COPPEZ-ZANTINGA; COPPEZ, 1998).

O crescimento dos registros de efeitos negativos da radiação no século passado se exacerbou ainda mais decorrente do uso extensivo de raios-X durante a Primeira Guerra Mundial (1914). Durante esse período, equipamentos móveis de raios X, ainda rudimentares, já eram empregados em campo. Apenas em 1915 que a British Roentgen Society adotou as primeiras medidas voltadas à radioproteção, como evitar exposição direta das mãos e distanciamento de fontes (TURNER, 2007, p.9).

Nos dez anos seguintes, diversos artigos foram publicados sobre os danos teciduais causados pela radiação. Nos anos 1920, diversos casos de câncer de pele passaram a surgir em funcionários que já trabalhavam com os primórdios da radiação. Assim foi estabelecido um dos primeiros atos de proteção radiológica, o conceito de "tolerância de dose", onde se considerava a exposição necessária para causar uma inflamação na pele (CLARKE; VALENTIN, 2008).

Fonte: [National Army Museum \(2014\)](#)

Fonte: Desconhecido

Figura 17 – Unidades Móveis de Tratamento com Raios-X durante a Primeira Guerra

No primeiro Congresso Internacional de Radiologia (ICR), realizado em Londres em 1925, uma das principais preocupações era a padronização das medições de radiação. O segundo Congresso Internacional de Radiologia, que ocorreu em Estocolmo, 1928, marcou a criação do que então foi chamado Comitê Internacional de Proteção contra Raios-X e Rádio, International X-ray and Radium Protection Committee (IXRPC).

Neste mesmo Congresso, o chamado de Comitê Internacional da Unidade de Raios-X (International X-ray Unit Committee), futuramente (ICRU), estabeleceu o Roentgen (R) como a primeira unidade de medida de radiação associada a raios-X. Em anos posteriores, a partir 1953 quando pesquisas no campo de radiobiologia passaram a ser centro de discussões, o ICRU passou a desenvolver conceitos como quantidade de dose absorvida, dose equivalente, efetividade biológica relativa e até mesmo o conceito de exposição. Nos anos 70, ocorreu também a adoção das unidades gray (Gy) e sievert (Sv) como unidades de dose absorvida e dose equivalente, respectivamente ([CLARKE; VALENTIN, 2008](#)).

Em 1950, a IXRPC teve seu nome mudado e oficialmente surgia a ICRP como a conhecemos nos tempos atuais, "International Commission on Radiological Protection". Ao passar das décadas, as recomendações da ICRP foram aprimoradas, e em 1958, a organização adotou o modelo de linearidade dose-efeito sem limiar (LNT), reconhecendo por fim a importância dos efeitos estocásticos da radiação.

Em 1990, a ICRP revisou suas recomendações, gerando a Publicação 60. Enfatizou-se a necessidade de otimização e redução dos limites de dose, com no controle da exposição do público e trabalhadores à radiação ionizante.

Em 2007 houve a última grande atualização do documento, gerando a Publicação 103. As recomendações de 1990 foram atualizadas, considerando agora os fatores de peso de cada tipo de radiação e tecidos para o cálculo das doses equivalentes e efetivas. Mantiveram os três princípios fundamentais de proteção radiológica: justificção, otimização e aplicação de limites de dose, o princípio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), esclarecendo sua aplicação às próprias fontes de radiação e aos indivíduos expostos ([ICRP, 1991](#)).

Reconheceram também, os diferentes tipos de exposição — planejadas, de emergência e existentes — aplicando os princípios de otimização fundamentais a todas elas (ICRP, 2007).

3.5 As Organizações Internacionais e suas Principais Publicações

Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) foi criada em 1957 para promover o uso pacífico da tecnologia nuclear e garantir sua segurança. Trabalha com cerca de 175 Estados-membros com intuito de estabelecer padrões internacionais, atuando como um centro de colaboração científica em ciência nuclear. A organização se baseia no conceito de "Átomos para Paz e Desenvolvimento", o equilíbrio entre os benefícios da energia nuclear e a minimização dos riscos associados.

Uma de suas funções principais é o desenvolvimento de padrões de segurança abrangentes, que desempenha um papel crucial na resposta a emergências nucleares ou radiológicas, coordenando a assistência internacional. Seu Centro de Incidentes e Emergências (IEC) atua globalmente para a preparação e resposta a emergências. Além disso, os bancos de dados da IAEA, como o Sistema Internacional de Informações de Monitoramento de Radiação (IRMIS), facilitam o compartilhamento de conhecimento durante situações de risco.

Dentre seus principais documentos, destaca-se o conjunto de documentos "Safety Standard Series", que estabelece requisitos e diretrizes para proteção contra radiações, segurança nuclear e preparação para emergências.

Outro relatório significativo é o "O Acidente de Fukushima Daiichi (2015)", que analisa as causas, consequências e conhecimentos obtidos com o desastre nuclear. O documento identificou deficiências na gestão de riscos e na cultura de segurança, reforçando a importância de preparação prévia de respostas a emergências.

Além disso, o Basic Safety Standards (BSS), elaborado em parceria com a OMS, fornece princípios unificados de proteção radiológica, retomando definições de limites de dose para exposição ocupacional, pública e médica, enquanto reforça o princípio ALARA - Tão Baixo Quanto Razoavelmente Alcançável (IAEA, 2019).

Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR)

O Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) foi estabelecido em 1955 pela Assembleia Geral das Nações Unidas. Tem

como sua principal missão avaliar e relatar os níveis e os efeitos da exposição à radiação ionizante, atuando como uma autoridade científica sobre os riscos associados à radiação.

O UNSCEAR coleta e analisa dados de diversas fontes de radiação, incluindo radiação de fundo natural, procedimentos médicos, exposições ocupacionais, acidentes nucleares e atividades industriais. Seus relatórios resumem tendências globais de exposição e avaliam os impactos da radiação na saúde e no meio ambiente.

Entre as contribuições mais importantes do Comitê estão as avaliações dos impactos de saúde de grandes acidentes nucleares, como os desastres de Chernobyl e Fukushima. Por exemplo, o Relatório UNSCEAR 2000 sobre Chernobyl forneceu uma análise detalhada das doses de radiação e das consequências de longo prazo na saúde, o chamado "Life Span Study".

Outro de seus documentos principais, o Relatório UNSCEAR 2013: Efeitos da Exposição à Radiação em Crianças, enfatiza a vulnerabilidade das crianças à radiação ionizante, revelando maior suscetibilidade a cânceres induzidos por radiação e propondo medidas de proteção específicas para populações pediátricas (UNSCEAR, 2025).

Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP)

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) foi fundada em 1928 e permanece uma das organizações mais influentes no escopo da proteção radiológica. Opera como um corpo independente, não governamental, que desenvolve recomendações e orientações para prevenir e minimizar os efeitos nocivos da radiação ionizante. A ICRP é amplamente conhecida por seu papel consultivo na definição de limites de dose, estratégias de otimização e abordagens de gestão de risco em várias aplicações da radiação.

As recomendações da ICRP são publicadas nos Anais da ICRP, que oferecem orientações detalhadas para cada campo de atuação que se utilize de radiação ionizante. A organização também promove iniciativas globais de capacitação, organizando workshops, seminários e programas educacionais para disseminar suas recomendações e promover sua adoção em todo o mundo.

Sua principal e mais abrangente publicação, nº 103 (2007), representa um marco em suas orientações e atualiza o Sistema de Proteção Radiológica, incluindo os princípios de justificação, otimização e limitação de dose, além de destacar a proteção ambiental (ICRP, 2025).

Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU)

A ICRU desempenha um papel crucial na padronização de métodos de medição e unidades relacionadas à radiação ionizante, no objetivo de unificá-las dentre as diversas áreas ao qual o uso de radiação é presente.

Entre suas principais contribuições, temos o "Report 33 (1980)", que define conceitos como dose absorvida e dose equivalente, o "Report 57" que apresenta meios de conversão de medidas físicas para quantidades de proteção radiológica e o "Report 85a" (2011), que revisa e introduz quantidades e unidades relacionadas à medição de radiações ionizantes (ICRU, 2025).

3.6 A CNEN

A CNEN surgiu em 1956 mas apenas se tornou uma autarquia federal em agosto de 1962, pela Lei 4.118. Tem como principal objetivo assegurar uma utilização segura e pacífica da energia nuclear, por meio do desenvolvimento, fornecimento e regulação de tecnologias nucleares.

Nacionalmente, a CNEN define e regula diretrizes e normas em proteção radiológica, emite licenças e fiscaliza a produção e o uso de do âmbito nuclear no Brasil.

Durante 67 anos de existência, a CNEN preservou sua estrutura organizacional, possuindo centros regionais de ciências nucleares. Dentre suas atividades são vinculadas Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação, Radioproteção e Segurança Nuclear (CNEN, 2021).

3.7 Conceitos Básicos de Radioproteção

3.7.1 Os Pilares da Proteção Radiológica

Em IAEA (2014), se definem o que se julga como os 10 princípios básicos da radioproteção:

- **Princípio 1:** Responsabilidade pela segurança
- **Princípio 2:** Quadro legal e governamental eficaz para a segurança, incluindo um órgão regulador independente.
- **Princípio 3:** Liderança e gestão para a segurança
- **Princípio 4:** Justificação de instalações e atividades,
- **Princípio 5:** Otimização da segurança, de modo a proporcionar o mais alto nível de segurança (que possa ser razoavelmente alcançado).
- **Princípio 6:** Medidas para controlar os limites exposição à radiação, devendo garantir que nenhum indivíduo sofra condição de riscos graves.

- **Princípio 7:** Proteção das gerações presentes e futuras em relação aos riscos trazidos pela radiação
- **Princípio 8:** Prevenção de acidentes radioativos
- **Princípio 9:** Preparação e resposta a emergências nucleares.
- **Princípio 10:** Ações de proteção para reduzir riscos radioativos existente

Além desses pilares principais, ideia de ALARA (As Low As Reasonably Achievable), também é bastante aplicada na radioproteção. Consiste, utopicamente, em reduzir a exposição à radiação para níveis nulos. Considerando, porém, aspectos sociais, econômicos e tecnológicos, este feito se torna inviável, dando seu nome "Tão Baixo Quanto Razoavelmente Alcançável" (IAEA, 2014).

A execução do princípio ALARA requer que todas as medidas de proteção sejam utilizadas de maneira eficiente, considerando o contexto da exposição.

Isso envolve não só a instalação de barreiras físicas de blindagem, mas também distanciamento da fonte e redução do período de exposição, como ilustrado na Figura 18.

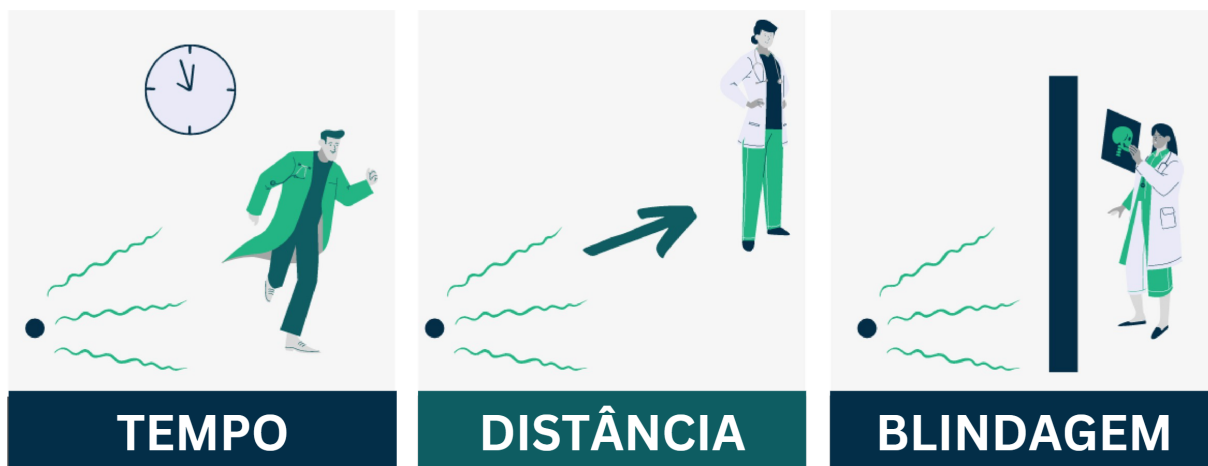


Figura 18 – Exemplo de aplicação do princípio ALARA, As Low As Reasonably Achievable

Fonte: [Versant \(2021\)](#)

3.7.2 Algumas Grandezas Radiológicas

A ICRP utiliza como base doses específicas para definir limites que evitem danos nos tecidos. Visando atingir esses objetivos, a Comissão utiliza os conceitos de dose absorvida, dose equivalente e dose efetiva.

Dose Absorvida:

É a quantidade básica de dose usada para todos os tipos de radiação ionizante. Tem sua unidade de medida dada por gray (Gy) no (SI), sendo equivalente a 1 J/Kg. A quantidade de dose absorvida pode ser medida, havendo normas estabelecidas para calcular o seu valor. Ao ser aplicada no âmbito da radioproteção, os valores de dose a serem considerados costumam ser o valor médio da dose absorvida distribuída em relação aos volumes de tecido. Presume-se que, em níveis baixos de dosagem ou baixas taxas de dosagem, a quantidade média de radiação absorvida pode ser associado ao dano causado, por tecido/órgão (ICRP, 2021, p. 33). "A relação entre a energia absorvida e a massa do volume de material atingido é a base da definição da grandeza", Tauhata et al. (2003, p. 134)

Dose Equivalente:

É definida com base na dose absorvida média, $D_{T,R}$, com base no tipo de radiação (R) e tipo de tecido/órgão (T) (ICRP, 2021, p. 33,34).

$$H_T = \sum w_R D_{T,R} \quad (3.13)$$

Os tipos de radiação R são determinados a depender da emissão e energia incidente no alvo de interesse. w_R é o fator "peso" associado a cada tipo de radiação R, apresentados pela Tabela 1. A unidade SI de dose equivalente é o sievert (Sv), onde $Sv = J/kg$.

Perceba que, apesar de o Sv e o Gy, aparentemente, serem a mesma unidade, representam aplicações diferentes, principalmente ao se tratar do âmbito radioproteção. Enquanto o Gy se refere puramente à dose absorvida, o Sv possui uma conotação de avaliação de riscos em exposições ocupacionais ou acidentais.

Tabela 1 – Fatores Peso para cada tipo de radiação. Foram omitidos os valores referentes ao nêutrons.

Tipo	Fator Peso w_R
Fótons	1
Elétrons e Múons	1
Prótons e Píons	2
Partículas Alfa, Fragmentos de Fissão e Íons Pesados	20

Fonte: (CNEN, 2024a, p. 34, Tabela II)

Equivalente de Dose:

É a dose absorvida localmente em um ponto no tecido ou órgão. É expressa por:

$$H = Q \cdot D \quad (3.14)$$

Onde Q é o fator de qualidade da radiação e D a dose absorvida. Apesar de depender diretamente da LET, valores aproximados fixos são tidos para cada tipo de radiação, sendo os principais: $Q=1$ para raios-x, gama e elétrons; $Q=10$ para prótons e partículas com uma unidade de carga; $Q=20$ para partículas alfa ou com carga superior à 1 (TAUHATA et al., 2003, p. 135). Também possui unidade SI como sievert (Sv), onde $Sv = J/kg$.

Dose Equivalente vs Equivalente de Dose:

Ao ser traduzida ao português, o definido como *Dose Equivalent* no documento original, ICRP 103, foi traduzido na NN 3.01 como Equivalente de Dose. O mesmo ocorreu com o termo *Equivalent Dose*, que se traduziu para Dose Equivalente. Até os dias atuais, a confusão com estes termos ocorre devido à tradução não intuitiva.

A principal diferença entre o fator de qualidade Q e o peso relacionado à radiação w_R está no contexto de aplicação e na maneira como tratam as interações da radiação, e seus danos, com os meios biológicos.

O fator de qualidade Q é uma grandeza antiga, definida pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU), e é baseado na LET da radiação, com perspectiva local - em um ponto do tecido ou órgão. Como visto anteriormente na Seção 3.3.1, radiações com alta LET possuem maior poder destrutivo ao DNA, refletindo diretamente nos valores atribuídos à Q . Isto acaba por gerar uma dependência da geometria de incidência da radiação, que, caso não seja uniforme, gera uma grande variação no valor do fator, mesmo que para o mesmo tecido.

Por outro lado, o peso da radiação w_R é o fator mais moderno, introduzido na Publicação 60 do ICRP (ICRP, 1991), para o cálculo da dose equivalente e da dose efetiva. O w_R reflete uma média estatística dos efeitos biológicos da radiação em populações humanas, incorporando dados experimentais e epidemiológicos e independentemente da distribuição real do campo radioativo.

Uma diferença importante entre os fatores Q e w_R está em seu escopo de aplicação. O fator de qualidade Q é aplicado localmente, ou seja, em pontos específicos de um tecido, se tornando útil para calcular doses em medições diretas - como em dosímetros pessoais. Já o w_R é aplicado em cálculos mais amplos, como na avaliação de doses médias absorvidas por tecidos como um todo, e serve para estimar riscos biológicos gerais - em exposições

ocupacionais ou ambientais e seus efeitos estocásticos. Como relatado em [ICRP \(2007, p.276\)](#), é interessante, para melhor compreensão, se pensar no fator peso w_R como uma média do fator de qualidade em diferentes órgãos e tecidos.

Dose Efetiva:

É definida como uma média ponderada das doses equivalentes recebidas por órgãos e tecidos, levando em conta o fator peso w_T associado a cada tecido. A dose efetiva representa uma média ponderada das doses equivalentes recebidas por diferentes tecidos do corpo, refletindo o risco relativo de efeitos estocásticos para cada tecido. Geralmente é utilizada em casos de exposição abaixo de 100 mSv ([ICRP, 2021, p. 35, 36](#)).

$$E = \sum w_T H_T \quad (3.15)$$

Os valores para os fatores peso de cada tecido/órgão, Tabela 2 são baseados na deterioração perante incidência radioativa. A unidade SI da dose efetiva, assim como a da dose equivalente, é o sievert (Sv).

Tabela 2 – Fatores Peso para cada órgão/tecido, normalizados.

Tecido/Órgão	Qtd. de Tecidos	Fator peso w_T	Contribuição Total
Gonadas	1	0,08	0,08
Pulmão, Cólon, Medula óssea, Mama, Supra-renais, Vesícula biliar, Coração, Rins, Nódulos linfáticos	6	0,12	0,72
Músculo, Mucosas, Pâncreas, Próstata/Colo do útero			
Tireóide, Esôfago, Bexiga, Fígado	4	0,04	0,16
Superfície óssea, pele, cérebro, glândulas salivares	4	0,01	0,04

Fonte: ([CNEN, 2024a, p. 34, Tabela A-III](#))

Exposição

É definida perante [ICRP \(2007\)](#) como a interação da radiação ionizante com a matéria, resultando na transferência de energia para o material exposto. É mais comumente utilizada em contextos anteriores à aplicação, ou, que não consideram de forma alguma efeitos biológicos da radiação como pauta principal - a exemplo de calibração de detectores ou monitoração ambiental.

A fórmula associada ao conceito de exposição é dada por:

$$X = \frac{dq}{dm}$$

Onde X é a exposição, medida em (C/kg) ou em Roentgen (R), dq é a soma das cargas elétricas de todos os íons de um sinal específico e dm : é a massa do meio onde essas cargas foram produzidas.

Essa fórmula é aplicável apenas para radiação eletromagnética e considera o ar como o meio de interação. Além disso, a exposição deve ser avaliada sob condições específicas de energia e distância da fonte.

Atividade

"A atividade de um material radioativo corresponde ao número de transformações nucleares por unidade de tempo" (TAUHATA et al., 2003). Matematicamente, é expressa pela equação:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (3.16)$$

A é a atividade do radionuclídeo e N representa o número de núcleos radioativos do composto. A unidade de medida da atividade, no SI, é o becquerel (Bq), equivalente a um decaimento por segundo s^{-1} . Outra unidade comumente usada até hoje é o curie (Ci), que corresponde a $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

É comumente calculada pela equação:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

Tendo "A" a atividade em um tempo t , em Bq ou Ci, A_0 é a atividade inicial, λ a constante de decaimento do isótopo e $t_{1/2}$ o tempo de meia vida deste.

3.7.3 As Grandezas Operacionais

As chamadas quantidades operacionais, foram introduzidas para conectar medições práticas feitas por instrumentos de detecção com as grandezas fundamentais de radioproteção, como a dose equivalente e a dose efetiva. Como estas duas grandezas são difíceis de se mensurar diretamente, as quantidades operacionais foram definidas como aproximações práticas dessas, permitindo que as medições sejam realizadas em situações reais de exposição à radiação. Dentre as principais grandezas temos as definições de $H_p(10)$, conhecido como equivalente de dose pessoal e $H^*(10)$, equivalente de dose ambiente.

O $H_p(d)$ é utilizado principalmente para medir o equivalente de dose em profundidade d em tecidos moles, representando a exposição em órgãos internos. Sua forma mais

utilizada é a calculada em um ponto do corpo a uma profundidade de 10 mm multiplicada pelo fator de qualidade da radiação incidente. Ao calibrar dosímetros pessoais simulando esta profundidade, a dose resultante se vê corrigida para superfícies que não a pele - uma vez que dosímetros geralmente ficam na altura do peito, superficialmente - simulando com maior fidelidade a dose absorvida pelo indivíduo.

Já o $H^*(10)$ é usado para medir a exposição ambiental de radiação, representando a dose equivalente a uma profundidade de 10 mm em uma esfera padrão de tecido-equivalente conhecida como *esfera ICRU*. Este foi um mecanismo de simplificação geométrica padronizada do corpo humano, introduzida pela ICRU. Ela possui 30 cm de diâmetro e é composta por materiais equivalentes ao tecido humano, com densidade de 1 g/cm^3 . A escolha dessa geometria permite cálculos isotrópicos e facilita o uso de coeficientes de conversão entre fluência de radiação e grandezas como o equivalente de dose ambiente, tornando-a uma referência indispensável para calibração de instrumentos de medição (ICRP, 2007).

Ao utilizar um detector Geiger-Müller para estimar o $H_p(10)$ ou o $H^*(10)$, é necessário conhecer o tipo e a energia da radiação medida. Isso porque os detectores Geiger-Müller, embora amplamente utilizados devido à sua simplicidade e portabilidade, não medem diretamente essas quantidades operacionais. Eles geralmente fornecem taxa de contagem (cps) ou taxa de dose absorvida no ar (mR/h). Para converter esses valores em $H_p(10)$ ou $H^*(10)$, aplicam-se fatores de calibração e coeficientes de conversão que levam em conta sua qualidade.

Para um Geiger-Müller que fornece leituras diretamente em Sv/h, há a possibilidade de estar calibrado perante o $H^*(10)$. Contudo, é crucial verificar a documentação técnica do instrumento para confirmar essa calibração e garantir que ela é apropriada para o tipo e energia da radiação em questão. Além disso, há de se considerar o posicionamento correto do detector na área de interesse e a geometria dos campos de radiação.

As quantidades operacionais surgiram como parte de um esforço global para harmonizar as práticas de proteção radiológica e alinhar as medições práticas com os conceitos teóricos de dose. Elas foram introduzidas pelas recomendações da ICRP e adotadas pela ICRU, com o objetivo de fornecer métricas práticas e confiáveis para monitoramento de exposição à radiação. Antes disso, a ausência de padrões claros dificultava a comparação de medições e, mais importante, a avaliação de riscos de radiação (ICRP, 2007).

3.7.4 A Blindagem

A blindagem radiológica é uma técnica essencial para proteger pessoas e equipamentos contra os efeitos da radiação ionizante, sendo amplamente utilizada em setores como medicina, indústria, pesquisa científica e geração de energia nuclear. Seu objetivo

é reduzir a intensidade da radiação a níveis seguros, por meio de materiais e métodos específicos, adequados ao tipo de radiação e às condições do ambiente.

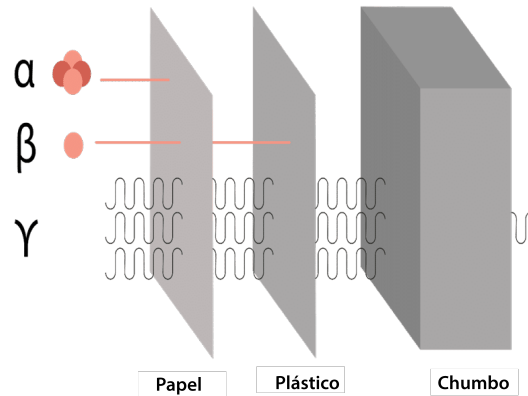


Figura 19 – Exemplo de penetração de radiação perante à tipos de blindagem

Cada tipo de radiação ionizante possui características específicas que determinam seu comportamento e os métodos de blindagem necessários. As partículas alfa, por exemplo, possuem alta densidade de ionização, mas baixo alcance, sendo facilmente bloqueadas por materiais simples como papel ou plástico. Já as partículas beta possuem maior alcance, mas geram radiação secundária quando interagem com materiais de alto número atômico, como o chumbo, tornando materiais como acrílico ou plásticos mais adequados.

A radiação gama e os raios-X, por sua vez, têm grande poder de penetração, exigindo o uso de materiais densos, como chumbo, concreto ou tungstênio. Por fim, os nêutrons interagem por colisão com núcleos atômicos e requerem materiais ricos em hidrogênio, como a própria parafina.

Dois conceitos fundamentais para projetar blindagens são o HVL (Half-Value Layer) e o TVL (Tenth-Value Layer). O HVL é a espessura de um material necessária para reduzir a intensidade da radiação pela metade, enquanto o TVL indica a espessura necessária para reduzir a intensidade a a 1/10 do valor inicial. As dependências de espessuras e coeficientes de atenuação seguem a equação:

$$I = I_0 \exp -\mu x \quad (3.17)$$

Em que I é a intensidade final do feixe, I_0 é a intensidade inicial, μ é o coeficiente de atenuação linear do material e x sua espessura. Manipulando a equação temos apenas que:

$$\text{HVL} = \frac{\ln(2)}{\mu}; \quad \text{TVL} = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (3.18)$$

A exemplo, para raios gama de 1 MeV, o HVL para chumbo é de cerca de 1 cm, enquanto o concreto requer aproximadamente 6 cm para alcançar o mesmo efeito.

Outro aspecto relevante para a blindagem é sua relação com cargas de trabalho, principalmente ao se tratar de aparelhos geradores de radiação. Inicialmente, a carga de trabalho projetada é definida com base na quantidade e tempo de uso do equipamento, o cenário de máxima operação. Assim, são feitos protótipos para blindagens ideais para dadas condições, seguindo para testes práticos para validar os níveis de propostos. Após a validação, um laudo técnico ou certificação é emitido, indicando a carga de trabalho máxima suportada pelo equipamento e a conformidade com as normas regulatórias, além da necessidade de blindagens adicionais e condições de instalação necessárias para garantir a segurança (ICRP, 2007).

Este conceito é especialmente importante ao nos referirmos de faixas de isenção para aparelhos, definidas por agências reguladoras.

3.8 Normas Nacionais de Proteção Radiológica

A proteção radiológica é um campo amplamente regulado e essencial em qualquer ambiente que envolva o uso de radiação ionizante. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabelece normas rigorosas visando a aplicação em diferentes setores, como a indústria nuclear, mineração, ambientes hospitalares e uso para fins de pesquisa. A radioproteção abrange não só o controle da exposição à radiação como também o manejo seguro de materiais radioativos, com o objetivo de proteger tanto os IOEs - Indivíduos Ocupacionalmente Expostos - quanto o público em geral. Para isto, uma série de normas, baseadas em anos de estudos de observação, tiveram de ser criadas, de forma a gerar uma padronização nos serviços que se utilizam de compostos radioativos.

3.8.1 NN 3.01 - Requisitos Básicos de Radioproteção E Segurança Radiológica de Fontes Radioativas

Dentre as normativas da CNEN, a norma NN 3.01, Requisitos Básicos De Radioproteção E Segurança Radiológica De Fontes De Radiação, CNEN (2024a) tem destaque, sendo referência fundamental ao se tratar do estudo de proteção radiológica. Se baseia fortemente nas Guidelines Internacionais ditadas pelo ICRP (2007), Publicação 103.

As principais partes responsáveis pela aplicação desta Norma são os titulares de instalações e atividades licenciadas pela CNEN, os empregadores, no que se refere à exposição ocupacional, os médicos especialistas, no que se refere à exposição médica, e as pessoas designadas para lidar com exposições de emergência ou existentes. Os responsáveis incluem supervisores de radioproteção, fornecedores de fontes e equipamentos,

físicos médicos, gestores designados pelo titular, além dos próprios trabalhadores sujeitos a exposição ocupacional.

Sobre os Titulares

Devem fixar objetivos de radioproteção, estabelecer uma estrutura adequada, assegurar a conscientização dos IOE sobre a segurança, garantir a segurança das fontes e executar programas de treinamento.

Podem delegar atribuições, mas permanecem responsáveis e devem formalizar e documentar a delegação, não podendo alegar desconhecimento das normas.

Devem dispor de supervisores de radioproteção certificados ou treinamentos conforme normas específicas da CNEN e disponibilizar resultados de programas de monitoração radiológica ambiental ao público. Ao terceirizar atividades, são responsáveis pela radioproteção dos trabalhadores terceirizados e seus registros de dose.

Sobre o Supervisor de Radioproteção

Os supervisores de radioproteção têm a responsabilidade de garantir o controle das fontes de radiação ionizante, a emissão de efluentes e resíduos radioativos, e as condições de proteção radiológica e segurança para os trabalhadores e o público.

Possuem a responsabilidade de cessar atividades de risco, devendo comunicar ao responsável pela instalação/equipamento sobre eventos relativos à proteção radiológica e a possíveis falhas previstas.

Dentre alguns dos seus deveres citados pela [CNEN \(2024a, p. 11, Seção V\)](#), constam:

- Realizar o treinamento e a avaliação dos funcionários
- Seguir o plano aprovado pela CNEN em situações de emergência
- Coordenar a elaboração e implementação do plano de proteção radiológica
- Garantir que os registros dosimétricos sejam sempre atualizados e revisados
- Manter em conformidade as áreas livres, supervisionadas e controladas
- Garantir a segurança de armazenamento das fontes de radiação ionizante

A Exposição Planejada

De acordo com [CNEN \(2024a, p.15, Seção I\)](#) se encaixam em categoria de exposição planejada as seguintes atividades:

I - o manuseio, a produção, a posse, a utilização, o transporte, o armazenamento e a deposição de material radioativo ou de rejeito e de dispositivos que contenham material radioativo, incluindo fontes seladas e não seladas e produtos de consumo;

II - a produção e uso de dispositivos que geram radiação ionizante, compreendendo os aceleradores de partículas e geradores de raios X;

III - a geração de energia nuclear, incluindo quaisquer atividades dentro do ciclo do combustível nuclear;

IV - o uso de radiação ionizante ou material radioativo para fins médicos, industriais, veterinários, agrícolas, jurídicos ou de segurança;

V - a utilização de radiação ionizante ou de material radioativo para fins educacionais, capacitação ou pesquisa;

VI - qualquer outra instalação ou atividade a ser especificada pela CNEN.";
(CNEN, 2024a, p.15)

A instituição Universidade de Brasília - e seus laboratórios - se classificaria, portanto, dentro do tópico V, atribuindo-lhe a categoria de exposição planejada.

Dos requisitos gerais, é necessário que a instituição solicite aprovação junto à CNEN. Isto inclui desde a escolha do local até o descomissionamento da instalação ou atividade, com base em critérios técnicos.

Sobre a responsabilidade dos titulares, especificadas agora às instalações ou atividades numa situação de exposição planejada, deve-se apresentar à CNEN um plano de proteção radiológica, conforme CNEN (2024a, p. 54, Anexo D), mantendo-se atualizados os procedimentos operacionais.

É obrigatório estabelecer procedimentos para notificação e análise de acidentes, garantir o manejo seguro de fontes e rejeitos radioativos, autorizar e cooperar com as fiscalizações da CNEN e buscar aprovação para alterações que afetem a proteção radiológica.

Além disso, deverá ser planejado o descomissionamento de acordo com as exigências da CNEN e elaborar um plano de emergência local. É estritamente obrigatório a instituição, caso não se enquadre no caso de isenção, possuir um ou mais supervisores e/ou profissionais com qualificação em radioproteção e segurança radiológica reconhecidos pela CNEN (CNEN, 2024a, p. 15, 16).

Todos os requisitos de proteção física, ou seja, segurança de armazenamento da fonte, devem ser atendidos de forma a evitar uma remoção não autorizada ou sabotagem de fontes.

Dentre a categorização e aplicações mais comuns de fontes radioativas, temos as informações representadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Categorização de Fontes Radioativas perante a Razão de suas Atividades^{a)}

Nº Categoria	Razão A/D ^{a)}	Aplicações comuns
1	$A/D \geq 1000$	Irradiadores de Grande Porte Irradiadores de Sangue Teleterapia
2	$1000 > A/D \geq 10$	Radiografia Industrial Braquiterapia
3	$10 > A/D \geq 1$	Medidores com fontes de alta atividade Perfilagem de Poços
4	$1 > A/D \geq 0,01$	Medidores com fontes de média e baixa atividades Braquiterapia de baixas doses
5	$0,01 > A/D$ e $A > \text{nível de isenção}$	Equipamentos de fluorescência Raios-X Equipamento de captura de Elétrons Fontes de espectroscopia Mossbauer

a) A é a atividade da fonte e D é a atividade de uma fonte que, sem controle ou medidas de proteção radiológica, pode vir a causar acidentes radiológicos

Fonte: NN 3.01, (CNEN, 2024a, p.35)

Sobre a Justificativa de Uso

Idealmente, só será justificado o uso de radiação quando associado a atividades ou instituições que tragam benefícios para a sociedade ou para os indivíduos expostos, compensando o possível dano correspondente à exposição.

Sobre a Otimização da Radioproteção

O processo de otimização deve considerar os recursos disponíveis para radioproteção, a distribuição das exposições individuais e coletivas, a probabilidade de exposições potenciais e as boas práticas. São estabelecidos valores de restrição de dose para otimização da radioproteção, (CNEN, 2024a, p.17; Art.47).

A comprovação da aplicação de medidas de otimização é dispensável se o projeto do sistema assegurar doses anuais médias abaixo de 1 mSv para IOEs e 10 μ Sv para o público. (CNEN, 2024a, p.17,18; Art.50)

Sobre a Exposição Ocupacional e Registros dos IOEs

Os trabalhadores expostos a ambientes supervisionados são considerados IOEs e precisam ser maiores de 18 anos. Jovens de 16 e 17 anos estão autorizados a entrar

nessas áreas para treinamento, contanto que estejam sob supervisão e cumpram os mesmos critérios de exposição que o público em geral (CNEN, 2024a, p.19; Art. 59).

Os trabalhadores que atuam em espaços abertos e os que eventualmente entram em áreas supervisionadas são designados como público. Isto se estende desde eventuais visitantes, como também a funcionários de manutenção.

Os IOEs devem obedecer a normas e procedimentos, usar os equipamentos de maneira correta, colaborar com os programas de proteção contra radiação, participar dos treinamentos e reportar quaisquer situações adversas relacionadas à segurança radiológica. Além disso, é dever dos titulares disponibilizar aos IOEs acesso aos seus registros de dose e fornecer o histórico de dose, se ou quando for solicitado.

A exposição de indivíduos em situações planejadas deve ser limitada para que a dose efetiva ou equivalente em órgãos ou tecidos não ultrapasse os limites especificados, exceto em circunstâncias especiais autorizadas pela CNEN. Os limites de doses anuais estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites superiores de dose anuais exigidos perante a NN 3.01 p18

Limites de Dose Anuais			
Tipos de Limite	Órgão	Exposição Ocupacional	Indivíduo do Público
Limites Estocásticos Dose Efetiva:	Corpo	20 mSv	1 mSv
	Inteiro		
Limites Determinísticos Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mão e Pés	500 mSv	–

Fonte: (CNEN, 2024a, p. 18)

Sobre a Classificação de Áreas

A fim de garantir a proteção radiológica e a segurança das exposições ocupacionais, os operadores das instalações devem categorizar as áreas como controladas, supervisionadas ou livres.

Uma área é considerada controlada quando são necessárias medidas específicas para gerir as exposições ocupacionais e evitar a propagação da contaminação durante as operações normais, seguindo as diretrizes de otimização e limitação de dose. Além disso, esta categorização também serve para prevenir ou minimizar o impacto das exposições causadas por falhas operacionais ou acidentes previstos. Se o projeto da área resultar em doses efetivas anuais de 6 mSv ou mais para indivíduos expostos ocupacionalmente (IOE),

ela deverá ser rotulada como controlada - independentemente de operações normais ou acidentes (CNEN, 2024a, p. 58; Anexo F; Art. 2).

É de importância delimitar estas zonas, mesmo quando a fonte de radiação é utilizada esporadicamente ou deslocada para áreas diferentes. Nos pontos de acesso deverão ser colocadas placas com o símbolo internacional de radiação ionizante, a frase “ÁREA CONTROLADA – Acesso Restrito” e a descrição da fonte ou equipamento de radiação. É necessário implementar medidas de proteção contra radiações e de segurança, tais como barreiras físicas e controles administrativos, de modo a limitar a entrada.

Além disso, os pontos de acesso devem ter equipamentos de proteção individual (EPI) e equipamentos de monitoramento dosimétrico disponíveis. Essencialmente, deve-se avaliar regularmente a necessidade de ajustar as precauções e limites de segurança e garantir que os trabalhadores que entram nessas áreas estejam bem informados sobre os requisitos de segurança e proteção.

Uma área precisa ser rotulada como supervisionada se houver necessidade de monitoramento contínuo devido à exposição ocupacional, mesmo que não seja controlada. Nessas situações, os responsáveis precisam marcar fisicamente a área, indicar os pontos de entrada e avaliar regularmente se são necessárias mudanças nas medidas de segurança ou nos limites do local delimitado (CNEN, 2024a, p. 58, 59; Anexo F; Art. 4).

Quaisquer áreas que não se enquadram nestes dois casos, são consideradas áreas livres no projeto.

Sobre o Plano de Radioproteção

De acordo com a NN 3.01 (CNEN, 2024a), o Plano de Proteção Radiológica (PPR) deve ser devidamente assinado pelo titular da instalação e pelo supervisor de proteção radiológica, garantindo o comprometimento com os requisitos estabelecidos. Este plano deve contemplar, no mínimo, um índice de conteúdo detalhado, que servirá como guia para a organização do documento.

É essencial que o PPR inclua a identificação completa da instalação, detalhando sua estrutura organizacional, descrição da equipe responsável, titular, e explicitar as funções, qualificações e jornadas de trabalho dos membros a serem citados.

Deve-se também especificar o objetivo da instalação, as fontes radioativas a serem utilizadas - informando suas atividades ou fabricantes, quando aplicável. A classificação da instalação conforme os grupos especificados na Norma CNEN NN 6.02 deve estar citada no documento, juntamente com os detalhes construtivos exigidos - blindagens empregadas e a classificação das áreas.

Outro ponto essencial são os procedimentos para a operação segura, incluindo a relação de Equipamentos de Proteção Individual (EPI). Se vê necessário manter registros,

incluindo o inventário de fontes de radiação e rejeitos, controle de entrada e saída de fontes, bem como identificar os responsáveis pela segurança e os autorizados a operar. Também devem ser especificadas no PPR instruções para monitoração de áreas e de proteção radiológica, abrangendo tanto medidas para evitar contaminação quanto procedimentos de segurança específicos para indivíduos ocupacionalmente expostos e público em geral (CNEN, 2024a).

No âmbito da gerência de rejeitos radioativos, a Norma exige a inclusão de etapas como separação, identificação, armazenamento e descarte para os usuários de radioisótopos, além de conter procedimentos específicos para situações de emergência - incêndios, inundações ou furtos de fontes radioativas.

Em relação ao encerramento das atividades, as instalações desses grupos devem apresentar um plano de descomissionamento, incluindo o inventário de materiais radioativos e o destino adequado de rejeitos e registros. Por fim, a Norma define que qualquer alteração nos itens relatados ou nos dados fornecidos à CNEN deve ser previamente comunicada e submetida à aprovação, garantindo conformidade com as exigências de segurança e proteção radiológica estabelecidas (CNEN, 2022, NN 6.02,).

3.8.2 NN 7.01 Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica

Outro ponto de destaque perante as normas nacionais é a certificação de supervisores de proteção radiológica, regulada pela CNEN por meio da NN 7.01 CNEN (2020). Essa certificação é obrigatória para os profissionais responsáveis por supervisionar as práticas de proteção radiológica em qualquer instalação que utilize fontes de radiação ionizante.

A certificação garante que os supervisores possuam as habilidades e conhecimentos necessários para implementar e monitorar os protocolos de radioproteção, especialmente em ambientes de pesquisa universitária. Nesse sentido, a adequação às normas de certificação é crucial para a segurança e para o cumprimento das diretrizes nacionais.

3.8.3 NN 6.02 - Licenciamento de Instalações Radiativas

Da Classificação das Instalações Radioativas

Perante a NN 6.02, as instalações - para fontes seladas - são divididas em 3 grandes grupos, sendo o de nosso principal interesse o Grupo 3, o qual engloba instalações que se utilizam ou armazenam fontes seladas, mas que não tem fins industriais e radioterápicos ou estejam em de grande porte (Grupo 1 e Grupo 2).

Dentre este, ainda se encontram 3 subgrupos:

- SUBGRUPO 3A - Instalações que utilizam fontes seladas com atividade inferior ou igual a 1/10 do valor de referência D, $S_N \leq 0,1$;
- SUBGRUPO 3B - Instalações que utilizam fontes seladas com atividade superior a 1/10 do valor de referência D e inferior ou igual a D $S_N \geq 0,1$ e $S_N \leq 1$;
- SUBGRUPO 3C - Instalações que utilizam fontes seladas com atividade superior ao valor de referência D, $S_N > 1$; (CNEN, 2022, NN 6.02, p. 3)

Com S_N sendo ditado pela equação 3.19, A_i sendo a atividade da fonte e D_i seu valor de referência que está associado ao risco de efeitos determinísticos em cenários de exposição não previstos:

$$S_N = \sum \frac{A_i}{D_i} \quad (3.19)$$

Em relação às fontes não seladas, abordagem semelhante é prevista, desta vez sendo dividida em grandes grupos, Grupo 4, 5 e 6. Seus grupos, porém, ao invés de serem classificados diretamente perante seu poder destrutivo em situações acidentais - como o Grupo 3 - são regidos pelos valores de nível de isenção - citados na NN 3.01. Sua equação então se apresenta na forma:

$$A_N = \sum \frac{A_i}{L_i} \quad (3.20)$$

Onde A_i é a atividade da fonte não selada e L_i o nível de isenção da mesma. A classificações seguem dados os seguintes limites:

- GRUPO 4, se A_N for menor ou igual a 30;
- GRUPO 5, se A_N for maior que 30 e menor ou igual a 20.000; ou
- GRUPO 6, se A_N for maior que 20.000. (CNEN, 2022, NN 6.02, p. 4)

Por fim, sobre instalações usuárias de radiação, temos às referentes as que se utilizam de equipamentos geradores de radiação ionizante, como aceleradores ou geradores de Raios-X, Grupo 7. Este grande Grupo é subdividido perante à energia de feixe gerado por estes aparelhos, lembrando novamente que estas classificações não são válidas para aplicações médico-industriais:

- SUBGRUPO 7A - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzam feixe com energia menor ou igual a 0,10 MeV;
- SUBGRUPO 7B - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,10 MeV e menor ou igual a 0,60 MeV;
- SUBGRUPO 7C - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,60 MeV e menor ou igual a 50 MeV; ou

- SUBGRUPO 7D - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 50 MeV. (CNEN, 2022, NN 6.02, p. 4)

Uma última classificação a ser brevemente comentada é a referente ao Grupo 8, instalações que são produtoras de rádio isótopos.

Os valores de D, L, dentre outras informações presentes em anexo à NN 6.02, serão melhor detalhados na Secção 4.5, posteriormente neste documento. De qualquer forma para fins de simplificação e âmbito deste estudo, serão melhor detalhados os grupos associados à baixas atividades e energias, e conseqüentemente, baixo risco - 3A, 4 e 7A.

Guia para o Licenciamento e Controle de Instalações Radiativas de Baixo Risco

Em CNEN (2019a), ainda é possível encontrar um link para Guias e Orientações específicas para Instalações de Pesquisa, que redireciona o usuário para o documento "Guia para o Licenciamento e Controle de Instalações Radiativas de Baixo Risco (classificadas nos Grupos 3A, 4, 7A e exceções do Grupo 5)" (CNEN, 2020).

O guia detalha o passo a passo para o preenchimento e envio de requerimentos administrativos, incluindo autorizações para operação inicial, renovação, alterações e descomissionamento de fontes radiativas, abordando o modo específico de identificação para instalações de ensino e pesquisa universitárias:

Os laboratórios de pesquisa deverão preencher o campo "Razão Social" com nome do laboratório precedido da sigla da universidade, no mínimo, e se aplicável, também a sigla do campus e do instituto. Em alguns casos, como institutos mais abrangentes, pode ser indicado o departamento.

Deve-se adotar UNIVERSIDADE/INSTITUTO/DEPARTAMENTO /LABORATÓRIO para a nomeação da instalação. (CNEN, 2020)

Ainda no âmbito universitário, detalha explicitamente a divisão de grupos, desta vez por tipo de aparelho possuído. O Grupo 3A abrange laboratórios de pesquisa que possuam medidores nucleares, cromatógrafos gasosos equipados com fontes de níquel-63 (Ni-63), fontes seladas destinadas à aferição ou uso didático, fontes seladas para calibração de equipamentos e sondas de nêutrons.

O Grupo 4 é composto por laboratórios que realizam radioimunoensaios, assim como laboratórios de pesquisa que empregam fontes não seladas, incluindo aquelas usadas como traçadores.

O Grupo 7A refere-se a laboratórios de pesquisa que fazem uso de equipamentos emissores de raios X que não são isentos perante os requisitos de proteção radiológica. Esses equipamentos incluem difratômetros, aparelhos médicos ou odontológicos utilizados

para fins de pesquisa, microscópios eletrônicos de transmissão e outros equipamentos que se enquadrem nas mesmas características de emissão.

Por fim, discute o processo importação de radionuclídeos ou equipamentos geradores de radiação ionizante, se fazendo necessário preencher a Licença de Importação (LI), e explicando as etapas de aprovação e andamento da solicitação após a chegada do produto em território nacional (CNEN, 2020).

Em geral, o processo de licenciamento destas categorias de instalação segue exatamente as informações e etapas do plano de radioproteção produzido para o uso informado, detalhado anteriormente na Secção 3.8.1.

3.8.4 A Isenção e Dispensa

A CNEN (2024a, p. 13,14), define que instalações e atividades, bem como as fontes associadas, que se encontram em situações de exposição planejada, podem ser isentas de controle regulatório, desde que a dose efetiva anual recebida por qualquer indivíduo seja igual ou inferior a 10 μSv . No entanto, essa isenção só se aplica a instalações e atividades que sejam justificadas e comprovadamente seguras.

Art. 27. Instalações e atividades e fontes associadas, em situações de exposição planejada, são isentas de controle regulatório, quando a dose efetiva anual a ser recebida por qualquer indivíduo for igual ou inferior a 10 μSv . (CNEN, 2024a, p. 13)

Além disto, é estabelecido que, em situações de exposição existente - que inclui exposição à radioatividade natural devido ao local, materiais e processos utilizados -, a isenção do controle regulatório será concedida quando a dose efetiva anual for inferior a 1 mSv (CNEN, 2024a, p.13).

Importante relatar que, além de isentas de controle regulatório, as instalações que se encaixam nesta categoria também são dispensadas do processo de licenciamento apresentado na Secção 3.8.3 (CNEN, 2022, NN 6.02, p. 9)

Esclarece-se que a isenção de qualquer instalação, atividade ou fonte individual depende de aprovação pela CNEN, sendo sujeita a condições específicas de controle, uso e, não menos importante, se tendo em consideração as propriedades físicas e químicas do material radioativo. Os responsáveis por essas instalações ou atividades isentas devem garantir que as condições de isenção sejam mantidas e informar a CNEN sobre quaisquer modificações que possam afetar essas condições. Também é reiterado que a dispensa não se aplica à liberação de efluentes radioativos no meio ambiente, que deve ser autorizada perante o licenciamento das instalações (CNEN, 2024a, p.14).

As tabelas de níveis de isenção de cada radionuclídeo catalogado podem ser encontradas no Anexos C de (CNEN, 2024a, p. 37-53).

Além disto, para o caso de n radionuclídeos, se vale a relação:

$$\sum \frac{A_i}{L_i} \leq 1 \quad (3.21)$$

Com A a atividade do radionuclídeo em questão e L seu nível de isenção

No âmbito de geradores de radiação, a CNEN também disponibiliza uma lista de equipamentos cadastrados, os quais são automaticamente considerados como isentos (CNEN, 2019b). Para casos não cadastrados, seguem os critérios de isenção como:

- III - para geradores de radiação: a) quando, em condições de operação normal, não causem uma taxa de equivalente de dose ambiente ou equivalente de dose direcional, conforme apropriado, maior do que $1 \mu\text{Sv/h}$ a uma distância de 0,1 m de qualquer superfície acessível do aparelho; ou
b) a energia máxima da radiação produzida seja inferior a 5 keV; ou
c) qualquer outro tipo de gerador definido pela CNEN.
NN 3.01, (CNEN, 2024a, p.14)

No documento de "Solicitação de Isenção dos Requisitos de Proteção Radiológica", consta que para este último caso que, é necessário anexar uma carta assinada pelo responsável pela empresa, detalhando os equipamentos para os quais se solicita a isenção. Além disso, deve ser apresentado um laudo técnico com certificação válida emitida pela CNEN, atestando que, em condições normais, o equipamento não causa uma taxa equivalente de dose ambiente maior que $1 \mu\text{Sv/h}$ a uma distância de 0,1 m das superfícies externas. Quando a emissão desse laudo técnico for inviável, serão aceitos laudos do fabricante com tradução juramentada (CNEN, 2019c).

4 Discussões e Resultados

Logo em uma primeira etapa de pesquisa, observou-se ser desafiador a identificação dos responsáveis pelo monitoramento e proteção radiológica dos laboratórios. Além disso, se sentiu uma imensa dificuldade na obtenção de informações relacionadas à radioproteção da universidade, mesmo com uma minuciosa pesquisa nos sites e documentos oficiais. Reparou-se que muito relacionado a este tópico se define no "boca-a-boca", sendo difícil encontrar informações oficialmente creditadas e registradas.

Notou-se, durante a pesquisa bibliográfica, uma imensa tendência ao se tratar da preocupação de proteção radiológica, com foco quase majoritário em profissionais da saúde e uso industrial. Tal inclinação é completamente justificável porém, motivou um questionamento sobre a falta de atenção aos laboratórios em meio acadêmico. Mesmo sabendo que as doses em meio universitário não se comparam às recebidas por profissionais do meio hospitalar, ainda assim é necessário ponderar sobre acúmulo de dose a longo prazo. É de importância ressaltar que também existem IOEs em meio de pesquisa universitário e que precisam ter seus ambientes de trabalho avaliados e exposição controlada.

Se julga que uma falta de atenção neste âmbito pode gerar uma eventual displicência ao se tratar do gerenciamento de fontes radioativas, podendo causar acidentes graves, não só para os integrantes do laboratório mas também para o público geral.

4.1 Sobre a existência de um Plano de Radioproteção da Universidade

Na busca de Planos de Radioproteção de outras Universidades e Institutos Federais, foi encontrado o PPR central do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) ([MINOTTO; ELBERN; JACOBSEN, 2017](#)). Este plano segue rigorosamente aos critérios exigidos por [CNEN \(2024a, p. 54, Anexo D\)](#), servindo de motivação para a procura de um documento semelhante para unidades acadêmicas da UnB. Porém, logo no início da busca, encontrou-se uma série de dificuldades.

Ao questionar sobre a existência de um Plano de Radioproteção geral para a Universidade de Brasília, ou até mesmo, setorizado por unidades acadêmicas, foi informado - oralmente, por meio da SeMa e, posteriormente, da CEST- que este não existe formalmente. O PPR desenvolvido para o Depósito de Rejeitos é teoricamente utilizado como base para as diretrizes individualizadas dos laboratórios.

Por não existir um plano centralizado, fica a critério individual de cada laboratório

a interpretação das normas nacionais propostas, e sua resolução burocrática diretamente com a CNEN. Com isto, não são atribuídas responsabilidades de gerenciamento interno de fontes sobre a SeMa ou sobre a CPRP. Além disso, o observado foi o trâmite direto com os responsáveis dos laboratórios interessados, e não com as unidades acadêmicas como um todo.

4.2 Dos Órgãos Administrativos Responsáveis: UnB

Em uma pesquisa inicial, encontrou-se que, oficialmente, o órgão primariamente responsável pelo gerenciamento de resíduos e proteção radiológica é a SeMa, juntamente com a Coordenadoria de Engenharia e Segurança do Trabalho (CEST), ao qual tem, dentro de suas atribuições;

"Compor/cooperar em atividades da área de meio ambiente e suporte juntamente com os membros da Coordenadoria de Gerenciamento de Resíduos Perigosos (GRP/SeMA) no que se refere à atualização e implementação do plano de radioproteção da Universidade de Brasília e auxílio nos serviços administrativos e operacionais, orientando e acompanhando o tratamento e destinação dos resíduos industriais e perigosos, incentivando e conscientizando o trabalhador da sua importância;"(DGP, 2015).

Com tais noções preliminares, traçou-se um plano de ação de pesquisa interrogatória, com objetivo de alcançar informações com maior embasamento e, muitas vezes, de caráter não-público. O caminho destacado em vermelho na Figura 20 evidencia a trajetória ideal desejada.

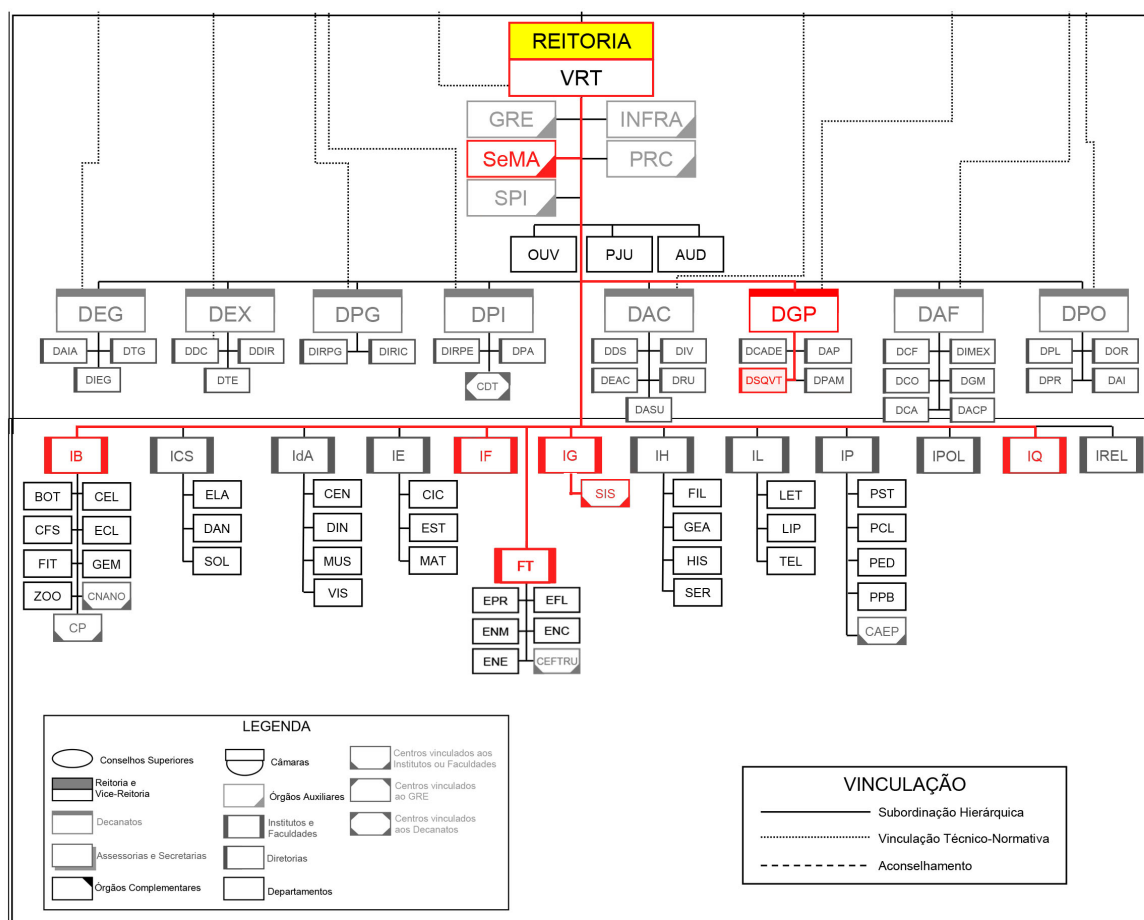


Figura 20 – Organograma condensado aos órgão e departamentos de interesse. O caminho delimitado na cor vermelha ilustra a trajetória de pesquisa idealizada para este estudo.

Fonte: (DPO Decanato de Planejamento; Orçamento e Avaliação Institucional, 2020)

4.2.1 A Coordenadoria de Engenharia e Segurança do Trabalho

A CEST faz parte da Diretoria de Saúde, Segurança e Qualidade de Vida no Trabalho (DSQVT), que por sua vez está subordinada ao Decanato de Gestão de Pessoas, de acordo com o organograma condensado representado na Figura 20.

Ao contatar diretamente o diretor da coordenadoria, foram esclarecidas diversas questões ligadas ao âmbito geral de gerenciamento da Universidade e a própria segurança do trabalho. Em nota, obtiveram-se as seguintes informações:

1. A Universidade de Brasília (UnB) não possui atualmente um Supervisor de Proteção Radiológica central, que seria o responsável técnico pela elaboração e assinatura de Plano de Radioproteção único. A radioproteção é tratada de forma descentralizada, com cada laboratório sendo responsável por atender às normas pertinentes e realizar seu registro junto aos órgãos de controle. O plano de radioproteção do depósito de

resíduos está sendo atualizado, servindo como base para um plano mais abrangente, que busca identificar usuários, locais e responsáveis.

2. A Comissão Permanente de Proteção Radiológica (CPRP) está atualizando o cadastro de usuários de radioisótopos e equipamentos geradores de radiação ionizante.
3. A Coordenadoria de Engenharia de Segurança do Trabalho (CEST) oferece suporte consultivo, mas a responsabilidade pelo monitoramento das doses de exposição à radiação e gestão dos dosímetros pessoais é do responsável direto por cada laboratório. A CPRP, instituída pelo Ato da Reitoria Nº 2556/2019, está ativa mas enfrenta desafios devido à descentralização do gerenciamento de fontes radioativas, incluindo padronização de práticas e manutenção de registros. Vêm também enfrentado dificuldades em relação à comunicação com unidades acadêmicas.
4. O monitoramento da exposição à radiação é responsabilidade de cada laboratório, que deve fornecer informações à área de segurança do trabalho quando solicitado. A CPRP tem a intenção realizar diagnósticos para centralizar controles e planejar visitas aos locais que trabalham com materiais radioativos.
5. A UnB não reportou incidentes radiológicos, mas caso venham a ocorrer, a CPRP e a CEST devem agir de forma coordenada, com base em protocolos de resposta detalhados nos planos de radioproteção locais.
6. A responsabilidade pelo treinamento de técnicos, alunos e professores recai sobre os responsáveis pelos laboratórios. A comissão e o CEST está buscando formas de oferecer treinamentos abrangentes, baseados em um diagnóstico para identificar setores e servidores que necessitam de capacitação.

Recentemente, a CEST se fez presente em diversos laboratórios do campus, provendo mapas de riscos dos locais, incluindo não só classificações relacionadas à riscos químicos, biológicos e de acidentes, mas também, riscos relacionados à exposição à radiação ionizante. Também discorre, para cada classificação, o impacto ao trabalhador e métodos de controle sugeridos para otimizar e minimizar possíveis danos. Um exemplo dos tipos de mapa instaurados segue como na Figura 21, para o Laboratório de Óptica e Moderna, Módulo 9 - IF, o laboratório portador dos radioisótopos a serem discutidos neste estudo.

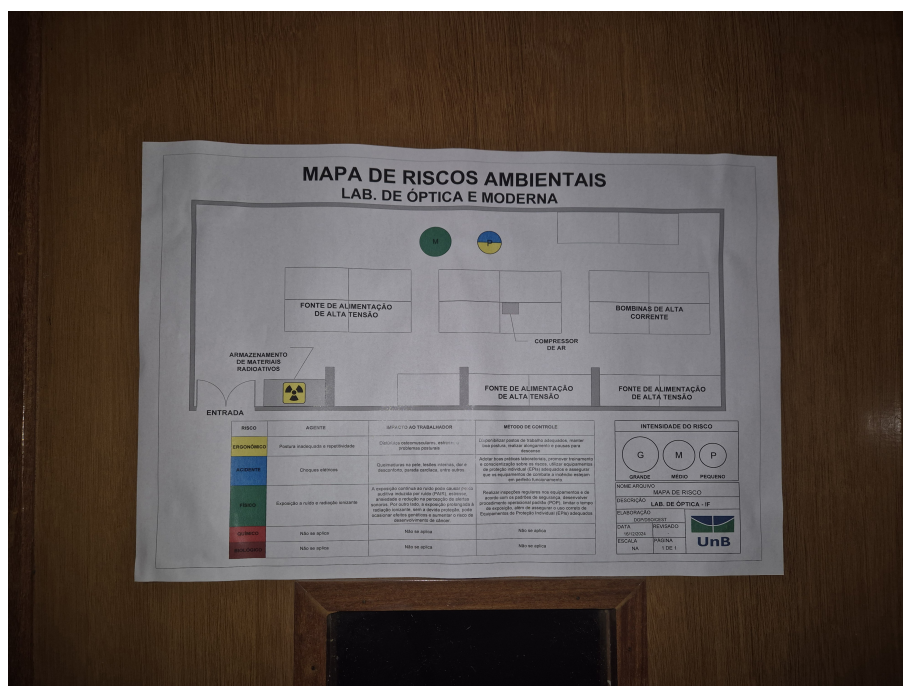


Figura 21 – Exemplo de Mapa de Riscos instaurados pela CEST em diversos laboratórios do campus

Apesar de não exclusivo ao tema de proteção radiológica, esta ação à engloba no sentido de conscientização e reconhecimento de possíveis ameaças que exposições descontroladas possam trazer.

4.2.2 A Secretaria do Meio Ambiente da UnB - SeMa

A Secretaria do Meio Ambiente (SeMA) da Universidade de Brasília é considerada um órgão auxiliar à Reitoria, e desempenha papel fundamental ao se tratar da promoção de sustentabilidade e implementação de programas ambientais no campus.

Das competências iniciais, o ATO DA REITORIA Nº 0151 (Reitoria, 2023, p. 1) define:

A Secretaria de Meio Ambiente (SeMA) exerce suas atividades por execução direta, em parceria com outras unidades ou por meio de serviços contratados pela UnB, na forma da legislação em vigor e em consonância com o interesse institucional, de modo a contribuir decisivamente para o cumprimento da missão da Universidade de Brasília (UnB), respeitados os princípios constitucionais da Administração Pública.

A SeMa possui 4 coordenações principais, sendo estas a Coordenação de Políticas Ambientais, Coordenação de Licenciamento, Coordenação de Áreas Verdes e, a que vamos dar enfoque neste trabalho, a Coordenação de Gerenciamento de Resíduos, responsável pelo gerenciamento de resíduos perigosos na Universidade Brasília.

No contexto do atual estudo, é o órgão responsável pelas ações de gerenciamento radiológico. Uma de suas responsabilidades é monitorar e gerenciar resíduos perigosos, principalmente provenientes de laboratórios no campus.

A secretaria lida diretamente com a CNEN, sendo o órgão mais próximo a se ter uma função centralizadora ao se tratar do gerenciamento de resíduos radioativos. Por possuir uma Coordenadoria de Gestão de Resíduos Perigosos (GRP), com recolhimento para classificação tipo C - Resíduos Radioativos (SEMA; SEMA/CGR, 2022, p. 33), a SeMa possui um contato esporádico com a CNEN, mas abordando especialmente a radioproteção e armazenamento do depósito de resíduos.

Atualmente, foi relatado que um dos funcionários do órgão se encontra informalmente responsável pelo contrato com a empresa de assessoria e proteção radiológica SAPRA Landauer, responsável pelo fornecimento e monitoramento de dosímetros individuais. Relatou-se que um formulário é enviado a cada um dos laboratórios cadastrados no programa de recolhimento de resíduos radioativos, deixando a critério de cada responsável informar da necessidade ou não de dosímetros individuais. Com isto, mesmo que indiretamente, há uma tentativa de centralização de contrato.

Os dosímetros individuais são peças imprescindíveis quando tratamos do âmbito de Proteção Radiológica. Felizmente, foi encontrado que o contrato de fornecimento de dosímetros individuais para a Universidade de Brasília foi renovado, agora com vencimento apenas ao final do ano de 2025. Ao menos assim, existe uma garantia de alguma segurança para IOEs, mesmo que não disponível a todos (BRASIL, 2024).

Foi também informado que a CNEN não estabelece rotinas de fiscalização no depósito de resíduos radioativos, de gestão da GRP, sendo a última fiscalização in loco realizada em julho de 2024, após, supostamente, um longo período sem inspeção. Até então, a própria CNEN não reconhecia a categoria do depósito de resíduos, em dúvida se este se enquadraria na finalidade de uso para pesquisa ou somente de armazenamento provisório. Se definiu pela última categoria, fazendo-se necessária uma atualização do plano de proteção radiológica regente, documento este em atual elaboração. O depósito também é classificado oficialmente como intermediário, apesar de nunca ter tido suas fontes armazenadas movidas para um depósito final da CNEN (CNEN, 2014). Pelo interesse do órgão, foi cedido acesso ao documento inacabado de forma a viabilizar a coleta de quaisquer informações relevantes a este estudo.

No que se refere ao gerenciamento de resíduos, especificamente radioativos, constatou-se uma ineficiência no processo de cadastro dos laboratórios que possuem compostos deste tipo. A universidade não possui um órgão oficial ativo, regularizador e central, dependendo da competência individual dos responsáveis de cada laboratório preencher o formulário de recolhimento de resíduos no site oficial da SeMa (SeMa, 2023).

4.2.3 A Comissão Permanente de Radioproteção - CPRP

Um primeiro questionamento surgiu em relação a própria existência de uma Comissão Permanente de Radioproteção (CPRP). O ATO DA REITORIA Nº 2556/2019 original não pode ser encontrado formalmente - com presença de assinatura digital, em PDF próprio, nem mesmo pela plataforma SEI, tendo conteúdo conhecido apenas por meio de citação em outros documentos (MAIA et al.,). Este ato revoga o original, de publicação em 1999, renovando os membros e seus respectivos departamento que compõem a Comissão.

Segue a suposta justificativa de reinstituição e atribuições da CPRP:

ATO DA REITORIA Nº 2556/2019

A REITORA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, no uso de suas atribuições, considerando as alterações das normas vigentes regulamentadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) CNEN-NN 8.01, CNEN-NE 3.02 e CNEN-NN 3.01; os riscos da gestão inadequada dos materiais radioativos na instituição e a segurança da comunidade acadêmica; a necessidade de controle das atividades e procedimentos associados à questões de resíduos radioativos;

R E S O L V E: Art. 1º Instituir a Comissão Permanente de Rádio Proteção (CPRP) da Universidade de Brasília, cuja atribuição é monitorar e avaliar a implementação das determinações estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear no âmbito da UnB.

Art. 2º Designar para compor a CPRP: Eduardo Ferreira Pereira (SeMA/CGR); Noberto Fontenele Frota (SeMA/CGR); Prof.^a Élide Geralda Campos (IB); Prof.^a Erondina Azevedo de Lima (IF); Mary-Ann Elvina Xavier (FAV); Daniel Nascimento Marques (CEST); Diego Medina Bueno (CEST); André Luiz Marinho Maia (CEST); e Thiago Antônio de Mello (DSQVT), sob a presidência do primeiro e vice-presidência pelo segundo.

Art 3º Este Ato entra em vigor a partir da data de sua publicação e revoga a Resolução da Reitoria nº 066/1999.

Mesmo tendo sua existência registrada perante a Reitoria, a CPRP não vem apresentando atividade própria. As atividades mais próximas de gerenciamento e regulamentação de fontes radioativas são realizadas pelos membros da própria SeMa. Não foram encontradas informações adicionais sobre os feitos da CRPR, muito menos a existência de site ou presença de atividade nos relatórios de gestão da UnB, DPO (2019). Até então, o único registro de atividade encontrado é o PPR do Depósito Provisório de Rejeitos Radioativos de 2001.

Enquanto no Relatório de Gestão de 2019, (Universidade de Brasília, 2019), constata-se a definição da CPRP, no Relatório de Gestão dos anos seguintes, não se encontra nenhuma outra citação do órgão.

Apesar de não vir apresentando atividades explícitas nos últimos anos, a CEST reiterou que a comissão continua em ativa, e com o intuito de registrar sítios com usuários de radiação. Apenas o fato de que a CPRP existir e não ser desativada, representa um grande passo em relação à radioproteção no campus.

4.3 Locais Portadores de Radioisótopos

Até o momento da redação e apresentação deste trabalho, foram identificados, nas Tabelas 5 e 6 os dados sítios com presença de fontes de radiação diretamente ionizante, ou seja, locais que se utilizam de radioisótopos dentro do campus. As informações foram fornecidas diretamente pela SeMa, sem última data de atualização, e demonstrando dados, por vezes, desatualizados.

Tabela 5 – Locais e Responsáveis identificados que possuem/fazem o uso de fontes de radiação.

Responsáveis	Instituto/ Departamento	Laboratórios	Possui número de autorização registrado perante a CNEN?	Possui equipamento de detecção de radiação?
Adriana Carmelo	Instituto de Geociências	Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas - LPFR	Não/ Desconhecido	Não se aplica
Joao Longo	Instituto de Ciências Biológicas - Dept. de Genética e Morfologia	Laboratório Nanobiotecnologia	Sim	Detector Geiger-Müller
Jose Coaquira	Instituto de Física	Laboratório de Espectroscopia Mössbauer	Sim	Detector Geiger-Müller
Marcia Renata Mortari	Instituto de Ciências Biológicas Dept. de Ciências Fisiológicas	Dept. de Ciências Fisiológicas (CFS)	Sim	Não se aplica
Alan Mol	Instituto de Química	Central Analítica	Não/ Desconhecido	Não se aplica
Plínio Alves	Faculdade de Tecnologia Dept. de Engenharia Elétrica	Laboratório de Plasma de Microondas	Não/ Desconhecido	Não
Junio Cruz	Instituto de Física	Laboratório de Ensino Módulo 9	Não se aplica ^{a)}	Detector de cintilação

a) Alega-se uso de fontes de baixa atividade, as quais não é necessária autorização

Fonte: SeMa/GRP - Documento não publicado, (MAIA et al.,)

Sobre informação das fontes, tipo de armazenamento e tipo de emissão, temos os dados referentes à Tabela 6.

Ao consultarmos diretamente à CNEN, por meio do endereço (CNEN, 2024b) e aba Instalações Autorizadas, foi possível constatar que o único laboratório com credenciamento vigente é o Laboratório de Espectroscopia Mössbauer, IF, com autorização prevista até a data 17/11/2026 e matrícula 15206.

Diferindo também das informações fornecidas pela Tabela 6, temos constando pelo site oficial a existência não só da fonte de Co-57 com atividade de 50 mCi, mas também

Tabela 6 – Locais, respectivas fontes utilizadas e informações adicionais documentadas.

Laboratórios	Aplicação Prevista / Frequência de Uso	Selada (S) ou Não Selada (NS)	Radionuclídeos	Atividade Inicial Prevista	Tipo de Emissão
Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas - LPFR	Análise Mineral de Rochas / Não definida	NS	K - 40	Desconhecida	${}^0_0\gamma, {}^0_1\beta$
			U - 238		${}^0_0\gamma, {}^4_2\alpha, {}^0_1\beta$
			Th - 232		${}^0_0\gamma, {}^4_2\alpha, {}^0_1\beta$
Laboratório Nanobiotecnologia	Marcador Biológico / Não definida	NS	18F - FDG	10 mCi	${}^0_1\beta$
			Tc-99m	10 mCi	${}^0_0\gamma, {}^0_1\beta$
Laboratório de Espectroscopia Mössbauer	Irradiação / Uso contínuo	S	Co-57	50 mCi	${}^0_0\gamma$
Dept. de Ciências Fisiológicas (CFS)	Neuromarcadores / Uso esporádico	NS	H-3	<3 μ Ci	${}^0_1\beta$
Central Analítica	Fonte ionizadora para detector de cromatógrafo gasoso / Não definida	S	Ni - 63	10 mCi	${}^0_1\beta$
Laboratório de Plasma de Microondas	Desconhecido	-	-	-	-
Laboratório de Ensino - Módulo 9	Ensino / Não definida	S	Cs-137	10 μ Ci, 5.0 μ Ci, 1.0 μ Ci	${}^0_1\beta, {}^0_0\gamma$
			Co-60	10 μ Ci, 2.0 μ Ci, 1.0 μ Ci	${}^0_1\beta, {}^0_0\gamma$
			Na-22	2.0 μ Ci	${}^0_1\beta, {}^0_0\gamma$
			Am-241	2.0 μ Ci	${}^4_2\alpha, {}^0_0\gamma$
			Ra-226	2.0 μ Ci	${}^4_2\alpha, {}^0_1\beta, {}^0_0\gamma$
			Po-210	0.1 μ Ci	${}^4_2\alpha$
			Sr-90	0.1 μ Ci	${}^0_1\beta$
Tl-204	1.0 μ Ci	${}^0_1\beta, {}^0_0\gamma$			

Fonte: SeMa/GRP - Documento não publicado, (MAIA et al.,)

uma fonte adicional de Sn-119 com atividade 15 mCi. Ambas fontes estão citadas de acordo no Plano de Radioproteção do laboratório associado.

4.4 Locais Portadores de Geradores de Radiação

Ainda em relação à identificação de sítios com fontes radioativas, observou-se outro impasse: os locais que possuem radioisótopos são registrados perante a SeMa devido ao programa de recolhimento de resíduos radioativos. Mas para fontes geradoras de radiação indiretamente ionizante, não há este mesmo registro, devido à não necessidade de recolhimento.

Com isto, outras estratégias de pesquisa foram tomadas. Por meio da Plataforma

Nacional de Infraestrutura de Pesquisa [PNIPE \(2025\)](#) e do documento Portifólio Infraestrutura de Pesquisa e Inovação da UNB, atualizado em 5 de dezembro de 2024, [UNB \(2024\)](#), foi possível localizar equipamentos e suas fabricantes. Por não ser um registro oficial específico, é possível que alguns laboratórios não tenham sido incluídos.

Dentre locais, até então identificados, que possuem fontes de radiação indiretamente ionizante - como Difrátômetros ou Microtomógrafos - temos a relação a seguir:

Instituto	Equipamento	Laboratório	Sigla	Na Relação de Equipamentos com Isenção?
IB	Bruker D8	Laboratório de Biofísica Molecular	LBFM	Sim
IQ	Bruker Smart Apex II	Central Analítica	CAIQ	-
IQ	Bruker D8 FOCUS	Central Analítica	CAIQ	Sim
IQ	Bruker D8 Advance	Central Analítica	CAIQ	Sim
IQ	Shimadzu EDX 720HS	Central Analítica	CAIQ	Sim
IF	Malvern Panalytical Empyrean	Laboratório de Difração de Raios X	LDRX/IF	Sim
IF	XENOCs XEUSS 2.0	Laboratório de Fluidos Complexos	LFC	-
IF	PHYWE XR 4.0	Laboratório de Ensino/IF	Módulo 9	Sim
CIP	Shimadzu XRD-6000	Centro Integrado de Pesquisa em Transição Energética	CIP TransEnerg	Sim
CIP	FEI-Termofisher Heliscan MK1	Centro Integrado de Pesquisa em Transição Energética	CIP TransEnerg	-
FT	Shimadzu XRD-6000	Laboratório de Caracterização Termomecânica e Microestrutural de Materiais Inteligentes	LABMatI	Sim
FT	FEI-Termofisher Heliscan MK1	Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanotecnológicos	LMCNano	-
FT	Themofisher Scientific K-Alpha	Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanotecnológicos	LMCNano	Sim
IG	Bruker SkyScan 1172	Laboratório de Estudos Geodinâmicos, Geocronológicos e Ambientais	LEGGA	Sim
IG	Bruker SkyScan 1172	Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas	LPFR	Sim
IG	Rigaku Ultima IV	Laboratório De Difractometria De Raios X	LDRX/IG	Sim

Tabela 7 – Locais Identificados com Fontes Geradoras de Radiação Ionizante

Entre os aparelhos fora da lista de isenção, não foram encontradas maiores informações, além da noção de que os aparelhos possuem "radiation safe enclosure", ou seja, possuem uma carcaça que evita exposição do usuário à radiação - uma blindagem intrínseca aos aparelhos. Não foi encontrado publicamente o geralmente chamado "Owner's Guide", manual do proprietário, onde esta informação possivelmente estaria presente.

4.5 O Instituto de Física

O Instituto de Física da Universidade de Brasília (IF UnB) possui dois principais equipamentos geradores de radiação ionizante identificados por este estudo: Xeuss 2.0 e Emyrean, localizados no Laboratório de Fluidos Complexos (LFC) e no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX), respectivamente. Esses instrumentos são essenciais para a caracterização avançada de materiais, contribuindo para pesquisas interdisciplinares e inovação tecnológica.



Figura 22 – Equipamento Xeuss 2.0 do Laboratório de Fluidos Complexos, IF (Imagem Ilustrativa)

No Laboratório de Fluidos Complexos (LFC), o Xeuss 2.0 é um sistema de espalhamento de raios X a baixos e médios ângulos (SAXS/WAXS), desenvolvido pela Xenocs. Esse equipamento permite a análise estrutural de materiais em escalas que variam do nanométrico ao micrométrico, sendo ideal para o estudo de nanopartículas, polímeros, filmes finos e materiais mesoporosos e amplamente utilizado em pesquisas relacionadas a energia renovável, biomateriais e nanotecnologia. Possui tubo de raios-X microfocal com que geram múltiplas energias - possuem anodos de Cobre e Molibdênio. Sua presença no LFC reforça a capacidade do laboratório em investigar sistemas complexos e colaborar com projetos interdisciplinares.

Foi informado pelo responsável que, durante a instalação do equipamento, foi feita uma consulta à Diretoria de Saúde, Segurança e Qualidade de Vida no Trabalho (DSQVT) com o objetivo de esclarecer as exigências de proteção radiológica e avaliar a possibilidade de concessão de bônus de insalubridade por trabalho com raios X. Na ocasião, a DSQVT concluiu que o equipamento não apresentava exposição significativa à radiação, e, por essa razão, não julgou necessário classificar o responsável e operador principal pelo aparelho como trabalhador exposto a radiações ionizantes.

Seguindo essa determinação, não há uso de dosímetros por nenhum dos operadores do equipamento, visto que a DSQVT não reconheceu a necessidade de monitoramento individual de exposição à radiação. Isso indica que a decisão foi tomada com base na

avaliação inicial da diretoria, sem a implementação de um plano de radioproteção formal.

Sobre a realização de medições de exposição radiológica no entorno do equipamento, foi esclarecido que o próprio responsável pelo laboratório conduziu levantamentos utilizando um contador Geiger, disponível, do próprio equipamento. Foi verificado que não há vazamento de radiação do feixe, o que reforça a segurança operacional do equipamento. No entanto, o responsável destacou que essas medições foram conduzidas de forma individual, sem uma ação institucional da UnB para validar os níveis de exposição. Inclusive, a decisão da DSQVT de classificar o equipamento como seguro foi tomada sem a realização de medições radiológicas oficiais.

No que se refere à delimitação de áreas controladas ou restritas, foi informado que a única restrição existente é o acesso à sala onde o equipamento se encontra instalado. Apenas pessoas treinadas e autorizadas podem operar o Xeuss 2.0.



Figura 23 – Equipamento Empyrean do Laboratório de LDRX-IF (Imagem Ilustrativa)

Já no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX), o Empyrean, fabricado pela Malvern Panalytical, é um difratômetro de alta resolução e versatilidade, projetado para análise estrutural de materiais cristalinos e semicristalinos. Equipado com óptica avançada e software inteligente, o Empyrean permite a determinação de estruturas cristalinas, identificação de fases minerais e estudos de tensão residual e textura, se tornando uma ferramenta valiosa para pesquisas em ciência dos materiais e geologia. Possui tubo de raios-X, com blindagem própria, que gera múltiplas energias, com anodos de Ferro, Cromo, Cobre, Molibdênio, dentre outros elementos.

Na resposta fornecida por este laboratório, foi informado pelo responsável que não

era necessário um plano de radioproteção, uma vez que o aparelho é classificado como isento, indicando que o aparelho não precisa de medidas específicas de controle além das já incorporadas no seu projeto fabricação.

No que se refere ao monitoramento da exposição à radiação dos usuários, foi relatado que dois dosímetros são utilizados pelos servidores do laboratório para acompanhar possíveis níveis de exposição, os quais, que são coletados mensalmente para a análise por empresas terceirizadas de dosimetria.

Sobre a existência de áreas controladas ou restritas devido à presença do difratômetro, foi informado que não há qualquer delimitação específica de acesso ao equipamento. O laboratório segue um regime de uso comum, sem a necessidade de barreiras adicionais para restringir a aproximação dos usuários ao aparelho. De qualquer forma, apenas indivíduos autorizados têm acesso ao laboratório como um todo, não sendo uma área de fácil acesso.

Partindo para o Laboratório Mössbauer do Instituto de Física da Universidade de Brasília (IF UnB), temos que este é o portador de uma das principais fontes encontradas, utilizada na espectroscopia Mössbauer, uma técnica que permite estudar propriedades hiperfinas de núcleos atômicos. Este método é especialmente útil para investigar a estrutura eletrônica, magnética e cristalina de materiais, com aplicações em ciência dos materiais, geologia, arqueologia, química e física do estado sólido. O laboratório é equipado com espectrômetros de alta precisão e uma fonte radioativa de Co-57, essencial para as medições. Um aspecto que torna o Laboratório Mössbauer do IF UnB único é o fato de ser o único laboratório da UnB cadastrado perante a CNEN, isto devido à atividade necessária para a fonte de Co-57.

4.5.1 Sobre o Plano de Proteção Radiológica do Mössbauer

Tendo que o cadastro perante a CNEN só é possível mediante a existência de um Plano de Proteção Radiológica, iniciou-se pela busca deste perante os responsáveis. A íntegra do documento em questão, datado de outubro de 2022, foi disponibilizado pela direção do curso e responsável pelo laboratório.

O PPR identifica a presença de duas fontes principais de radiação: Co-57 e Sn-119, ambas encapsuladas e com atividades iniciais respectivas de de 50 mCi (1,85 GBq), selada em 2013, e de 15 mCi (0,6 GBq). O plano também detalha áreas de acesso restrito e os equipamentos utilizados, como criostatos de hélio líquido e espectrômetros Mössbauer.

De acordo com o plano fornecido e a Norma 6.02 (CNEN, 2022, p.3), temos constatando que o S_N calculado se têm por menor que 0.1, ou seja, a atividade é consideravelmente menor que seu poder destrutivo, se enquadrando no Grupo 3, Subgrupo 3A.

No atual ano de realização deste trabalho, em fevereiro de 2025, como possui meia

vida de 271,4 dias, o Co-57, se encontra com aproximadamente 25,9 kBq de atividade. Considerando seu nível de isenção definido por 10^3 kBq, a fonte se encontra em estado de livre de controle regulatório e fiscalização.

O documento especifica o diretor do Instituto de Física e o responsável técnico pela proteção radiológica e também define a divisão de áreas controladas e restritas - sendo o corredor de acesso ao laboratório uma área restrita, que dá acesso à sala principal, onde estão instalados os espectrômetros e criostatos. O treinamento contínuo é um dos elementos essenciais destacados no plano, visando garantir que todos os envolvidos estejam cientes dos riscos e das medidas de proteção necessárias.

Além disso, documento também cita que o laboratório dispõe de diversos equipamentos de monitoração radiológica, como dosímetros individuais utilizados pelos trabalhadores para medir sua exposição à radiação e detectores que monitoram continuamente os níveis de radiação no ambiente. Estabelece que todas as atividades realizadas no laboratório sejam registradas em "logbooks" específicos, garantindo a rastreabilidade e o controle das operações.

O gerenciamento de rejeitos radioativos é um ponto fundamental no PPR. O plano prevê o armazenamento temporário seguro das fontes até que a atividade radioativa atinja níveis seguros, seguido do descarte final de acordo com as normas da CNEN.

Em relação às situações de emergência, o documento detalha os procedimentos que devem ser adotados em casos de vazamentos ou quebras de fontes seladas, falhas nos sistemas de contenção ou exposição acidental de trabalhadores. O plano estabelece medidas de evacuação e descontaminação imediata para minimizar riscos e proteger a saúde dos envolvidos.

Por fim, prevê um plano de desativação da instalação caso as atividades do laboratório sejam encerradas. Esse plano inclui a remoção segura das fontes radioativas, a descontaminação das áreas afetadas e a emissão de relatórios finais para a CNEN.

4.5.2 Sobre o Laboratório de Ensino e seu Levantamento Radiométrico

As Fontes

Um levantamento atualizado, do ano de 2024, foi fornecido pelo técnico responsável do módulo. A relação de fontes atualizadas e suas respectivas atividades atuais segue na Tabela 8:

Radioisótopo	Qtd.	Tipo de Selagem	Emissão	Meia Vida (anos)	Ano de Selagem	Atividade Inicial (kBq)	Atividade Atual Individual (kBq)
Americío 241 (Am-241)	1	Bastão	${}^4_2\alpha, {}^0_0\gamma$	432,2	1978	74	68,74
	1	Bastão		432,2	1978	74	68,74
Césio 137 (Ce-137)	1	Bastão	${}^0_{-1}\beta, {}^0_0\gamma$	30,2	Indisponível	370	Indisponível
	1	Pastilha		30,2	1982	37	14,11
	4	Pastilha		30,2	1999	37	20,8
Cobalto 60 (Co-60)	7	Pastilha	${}^0_0\gamma$	30,2	1999	37	20,8
	1	Bastão		5,27	Indisponível	370	Indisponível
	1	Bastão		5,27	1978	74	0,17
	5	Pastilha		5,27	1999	37	1,58
	6	Pastilha		5,27	1999	37	1,58
Estrôncio 90 (St-90)	3	Pastilha	${}^0_{-1}\beta$	5,27	2013	37	9,93
	1	Bastão		29,1	Indisponível	111	Indisponível
	5	Pastilha		28,6	1999	3,7	2,07
Polônio 210 (Po-210)	6	Pastilha	${}^4_2\alpha$	28,6	1999	3,7	2,07
	5	Pastilha		138	1999	3,7	0,00
Rádio 226 (Ra-226)	6	Pastilha	${}^4_2\alpha, {}^0_{-1}\beta, {}^0_0\gamma$	138	1999	3,7	0,00
	1	Bastão		1600	Indisponível	74	Indisponível
Sódio 22 (Na-22)	1	Bastão	${}^0_0\gamma$	2,6	1999	74	0,09
	1	Bastão		2,6	1999	74	0,09
	1	Bastão		2,6	1978	74	0,00
	4	Pastilha		2,6	2013	37	2,57
Telúrio 204 (Tl-204)	5	Pastilha	${}^0_{-1}\beta, {}^0_1\beta$	3,78	1999	37	0,31
	6	Pastilha		3,78	1999	37	0,31

Tabela 8 – Levantamento atualizado das fontes referentes ao Laboratório de Ensino do Instituto de Física, Módulo 9

As fontes de maior atividade estão devidamente guardadas em castelos blindados ou envoltas em manta de chumbo, permanecendo trancadas em um armário metálico, sem livre acesso, mostrado na Figura 24. Onde lê-se "indisponível" na Tabela em questão, temos fontes as quais não foram possíveis encontrar informações sobre o ano de selagem, e, portanto, não se tem uma estimativa da atividade atual.

Para casos de mais uma fonte, é importante lembrar que a condição para esta dispensa se torna a somatória de sua atividade dividido pelo seu nível de isenção com valor menor ou igual a 1, como relatado na equação 3.21.



Figura 24 – Armazenamento das Fontes do Laboratório de Ensino, Módulo 9 - IF

Como possível perceber pela Tabela 9, apesar de todos os valores de A/D estarem dentro dos limites exigidos para isenção - muito menores que seu risco em exposições não planejadas - a segunda condição necessária se mostra distante do desejado. Mesmo com alguns tipos de radionuclídeos, como Co-60, consagrando seu nível de isenção, o conjunto de todos os agentes apresenta cerca de 40 vezes o número exigido para isenção, mesmo não considerando fontes que não possuem ano de selagem, como o Ra-226. Outras espécies de radioisótopos, porém, nem individualmente passariam a condição de nível de isenção, como as pastilhas de Césio-137.

Radiosótopo	D (kBq)	Atividade Atual Total (kBq)	A/D	Atividade de Isenção (kBq)	Atividade total/ Nível de Isenção
Am-241	$6,0 \cdot 10^7$	137,48	$2,29 \cdot 10^{-6}$	10	13,75
Cs-137	$1,0 \cdot 10^8$	242,91	$2,43 \cdot 10^{-6}$	10	24,29
Co-60	$3,0 \cdot 10^7$	47,34	$1,58 \cdot 10^{-6}$	100	0,47
Sr-90	$1,0 \cdot 10^9$	22,77	$2,28 \cdot 10^{-8}$	10	2,28
Po-210	$6,0 \cdot 10^7$	0	0	10	0
Na-22	-	10,46	-	1000	0,011
Ra-226	$4,0 \cdot 10^7$	-	-	10	-
Tl-204	$2,0 \cdot 10^{10}$	0,62	$3,10 \cdot 10^{-11}$	10	0,06
				Soma	40,86

Tabela 9 – Atividades atuais das fontes comparadas aos seus critérios de isenção propostos pela NN 3.01. A atividade total se refere à somatória das atividades individuais das fontes guardadas em conjunto. (CNEN, 2024a)

Não se teve acesso à data de aquisição das fontes nem de seu processo de licenciamento, não podendo afirmar se houve autorizações de isenção por parte da CNEN.

Vê-se então, realmente necessário o armazenamento das dadas fontes em castelos. Além disto, o Cs-137, um dos principais contribuintes para a elevação do valor soma,

se encontra não só abraçado por uma manta de chumbo, como também em uma caixa própria, menor, composta por mais uma camada de chumbo. Estas medidas mostraram-se eficazes com os resultados do próximo passo deste trabalho, o estudo radiométrico.

É interessante explicitar o fato que, no caso de poucas unidades de fonte, com mesma atividade que as da análise, teríamos uma possibilidade bem mais expressiva de se alcançar o nível de isenção exigido. Uma solução potencial para otimização seria o armazenamento separado das fontes, em diferentes salas, mesmo que dentro do mesmo laboratório. Atualmente, todas as fontes estão armazenadas em um único local, o que contribui para o alto valor da somatória de atividades, dificultando a obtenção da isenção. Isto, porém, poderia gerar uma maior dificuldade de gerenciamento e controle de inventário destas fontes, o que abriria possibilidade para possíveis perdas ou extravios, criando-se um problema ainda maior do que a situação existente.

Apesar de possuir diversas fontes, o uso para o fim experimental e educativo do laboratório, atualmente, se limita à fonte de maior atividade do Amerício-241, utilizada para o experimento de Millikan, sendo também, uma das principais fontes armazenadas nos castelos de chumbo.

Além dos radioisótopos, também se encontra in loco um gerador de raios-X do modelo XR 4.0 PHYWE, que possui tubos de raios -X com anodos de Ferro, Cobre, Molibdênio e Tungstênio. Foi informado, pelo técnico responsável, que o atual modelo foi incluído na lista de isenção de aparelhos através de uma solicitação durante seu processo de importação e aquisição. Este difratômetro foi recentemente adquirido com o objetivo de troca de um modelo obsoleto da mesma marca. Em relação ao aparelho antigo, foi apenas informado que está em processo de transferência de patrimônio à outro laboratório que não o de origem, uma vez que também era isento de medidas de proteção radiológica.

O Levantamento Radiométrico

Ao pensar no levantamento radiométrico do laboratório de ensino, foram encontradas uma série de dificuldades.

Em um primeiro momento, foi tentado um contato com empresas de metrologia, como Metrobrás e SAPRA, de forma a obter uma parceria e fornecimento de dosímetros de área. Porém, ao não ser obtida nenhuma resposta positiva, a estratégia modificou-se para monitores instantâneos de área.

As medidas foram feitas com um medidor tipo Geiger-Muller, medidor este que embute, intrínscamente, uma série de incertezas. Este levantamento de forma alguma substitui um feito por uma empresa profissional, uma vez que, por serem instantâneos, não foi possível um monitoramento ao longo de dias decorridos como faria um dosímetro de área.

Para as medições com Geiger-Muller, foram feitas ao longo do período de 3 dias, em distâncias de 1 metro e aproximadamente 10 centímetros do armário que armazena as fontes no laboratório de ensino. Também foi feita a medição na parede de trás do armário, como segue na Figura 25. Além disto, também foram feitas as mesmas medições com a porta do armário aberta, na esperança de se obter maior contribuição de partículas beta. Foi também medida a radiação de fundo do local, com o detector do outro lado do cômodo.



Figura 25 – Imagens do setup montado para aferição das taxas de dose do local

Importante relatar que se teve o cuidado de garantir que o detector não entrasse em estado de avalanche, apesar de improvável devido às baixas taxas de dose captadas.

O Geiger utilizado, Modelo BR-6, realiza uma média de valores a cada 5 minutos. Das demais informações sobre o modelo temos que este é capaz de detectar radiações beta, gama e raios X, com um sensor que opera em uma faixa de energia de 50 keV a 1,5 MeV, com erro relativo intrínseco inferior a $\pm 10\%$. Sua sensibilidade é de 80 cpm/ μSv para Co-60. Além disto, o equipamento suporta uma taxa máxima de dose equivalente de 99,99 $\mu Sv/h$.

A média de taxa de dose medida pelo aparelho em um período de 3 dias, durante 1 hora seguida em cada, para a radiação de fundo do ambiente, obteve-se o valor de 0,13 $\mu Sv/h$. Foram obtidos um conjunto de dados 12 dados dia para cada situação de exposição, totalizando 36 dados para cada. Foi feita novamente a média dos valores e normalizados em relação à radiação de fundo para cada situação exposta.

Estimou-se ainda a dose exposta considerando a carga horária padrão técnicos expostos e a carga horária de um estudante que participaria de 2 aulas de 4 horas por semana, do dado laboratório. Além disto, também estimou-se a dose de um estudante que frequenta-se a sala 20 minutos por semana e dose total em uma extrapolação, 24 horas por

	1 m fechado	10 cm fechado	1 m aberto	10 cm aberto	Interior armário
Média de Dados Normalizados ($\mu\text{Sv/h}$)	0,0325	0,13625	0,04	0,17625	1,04375
Dose (μSv) - Carga Horária de 30 horas semanais, em 1 ano	46,8	196,2	57,6	253,8	1503
Dose (μSv) - Carga Horária de 8 horas semanais, em 1 ano	12,48	52,32	15,36	67,68	400,8
Dose (μSv) - Carga Horária de 20 minutos semanais, em 1 ano	0,52	2,18	0,64	2,82	16,7
Dose (μSv) Extrapolada ao período de 1 ano	284,7	1193,55	350,4	1543,95	9143,25

Tabela 10 – Média de Taxa de Dose e extrapolações para cargas horárias de 30 horas semanais, 8 horas semanais e 1 ano

365 dias. Todas estas medidas foram calculadas considerando as 48 semanas do período de um ano.

Vale enfatizar que estes são cenários extrapolados, uma vez que esta seria a dose recebida para caso o indivíduo permanecesse no mesmo local e mesma distância, por muitas horas semanais.

Pela Tabela 10, percebe-se que apenas com extrapolação de dose considerando a mesma exposição durante 24 horas dos 365 dias no ano, temos o limite de 1mSv , para o público, violado, isto, em uma proximidade de 10 cm do armário e seu interior.

Considerando o caso mais possível dentre os apresentados - o de 20 minutos semanais com distância de um metro do armário fechado - temos que o valor obtido é cerca de 5,2% do limite estabelecido para isenção de medidas de proteção radiológica, $10\ \mu\text{Sv}$, como apresentado na Secção 3.8.4.

Reitero novamente o caráter impreciso destas aproximações, sendo necessário, para conclusões concretas sobre as doses recebidas, o uso de um dosímetro pessoal. Mesmo assim, observando estas extrapolações podemos nos situar sobre a proporção e ordem de grandeza do problema.

4.6 Sobre os Isótopos em Outros Departamentos

Dentre os demais institutos portadores de fontes de radiação ionizante, como geradores ou radioisótopos, teve-se resposta de dois principais: O Instituto de Geologia e o Instituto de Química.

Infelizmente, até o momento de realização deste estudo, não se obteve maiores respostas sobre os radioisótopos traçadores dentro do Instituto de Biologia.

4.6.1 Instituto de Geologia

Dentro do Instituto de Geologia foi possível o contato com dois laboratórios principais: O Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas, portador tanto de radionuclídeos quanto geradores de radiação ionizantes, e o Laboratório De Difractometria de Raios X, portador apenas do último.

Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas: Durante a visita ao Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas, verificou-se que, conforme os registros de recolhimento de resíduos, há sim a presença dos radionuclídeos potássio-40 (K-40), urânio-238 (U-238) e tório-232 (Th-232). Em consulta à responsável pelo laboratório, foi esclarecido que a principal fonte de radiação no ambiente provém de materiais naturais, como rochas de granito, cuja emissão predominante é de radiação gama.

Quanto aos radionuclídeos U-238 e Th-232, foi informado que estão presentes apenas em quantidades reduzidas e que foram originalmente adquiridos junto a câmaras de ionização antigas - estes materiais costumavam vir junto a este tipo de detector e eram utilizados como calibração, mas, atualmente, não estão mais em uso. Não foi informado seus valores quantitativos de peso nem atividade, apenas que se encontravam em pouquíssima quantidade. Em relação ao K-40, constatou-se que este elemento faz parte das atividades do laboratório, embora tenha sido relatado que sua atividade é baixa. No entanto, também não foi especificado um valor numérico exato para essa atividade.

A regulamentação da CNEN em relação aos radionuclídeos naturais estabelece critérios específicos para a isenção e controle de materiais contendo esses elementos. Segundo a Norma CNEN NN 3.01, exposições decorrentes da presença de K-40 no corpo humano, da radiação cósmica na superfície da Terra, bem como de solos e rochas que contenham radionuclídeos naturais não modificados, são excluídas do escopo regulatório. Além disso, a isenção também se aplica a materiais e matérias-primas que contenham concentrações de radionuclídeos das séries do urânio e do tório inferiores a 1 Bq/g e para o K-40 inferiores a 10 Bq/g (CNEN, 2024a, p.2).

Adicionalmente, foi informado que o laboratório dispõe de um Microtomógrafo Skyscan, modelo 1172. Esse equipamento está listado na Relação de Equipamentos com

Isenção de Requisitos de Proteção Radiológica, o que significa que não há exigências adicionais de proteção, além do cumprimento das normativas gerais de uso do aparelho e do monitoramento das condições de operação do laboratório.

No que se diz respeito à monitoração da exposição de indivíduos, foi relatado pela responsável que, em laboratórios adjacentes, já houve a utilização de dosímetros individuais por determinado período, sendo que os registros ao final do monitoramento indicaram dose equivalente a zero, reforçando a inexistência de exposição significativa à radiação ionizante no ambiente.

Por fim, no que se refere ao controle de acesso às áreas do laboratório, além das restrições usuais de entrada, não se identificou a necessidade de adoção de medidas adicionais de limitação ou controle, uma vez que os níveis de radiação encontrados não justificam a imposição de barreiras adicionais.

Laboratório de Difractometria de Raios-X: Já se tratando do laboratório de Difractometria de Raios-X do Instituto de Geologia, foi informado pelo responsável que há um plano de radioproteção implementado, contudo, sem a presença de um supervisor de radioproteção designado, apesar de seu aparelho de uso, o Rigaku Ultima IV, possuir isenção perante a CNEN. O monitoramento da exposição dos usuários é realizado por meio da análise de dosímetros individuais, um procedimento terceirizado por uma empresa especializada.

Em relação à avaliação dos níveis de exposição no ambiente do laboratório, o responsável relatou que uma medição foi conduzida anteriormente por uma equipe de segurança do trabalho, mas não há uma periodicidade definida para novas verificações.

No que se refere à delimitação de áreas controladas ou restritas, o responsável afirmou que essa medida não foi necessária, uma vez que o difratômetro de raios X conta com blindagem de proteção contra a emissão de radiação. Foi destacado que o equipamento opera com um sistema de segurança que impede a ativação da fonte de raios X caso a câmara de radiação não esteja devidamente fechada, além de contar com um alarme automático para situações em que tentativas indevidas de operação sejam detectadas.

4.6.2 Instituto de Química

No Instituto de Química, obtêve-se resposta da Central Analítica, que possui um cromatógrafo equipado com uma fonte de Níquel-63 (Ni-63), atividade $3,7 \cdot 10^5$ kBq, com nível de isenção definido pela NN 3.01 de $1 \cdot 10^5$ kBq. Foi informado pelo responsável que não há um plano de radioproteção implementado, nem registros de que tenha sido necessário algum procedimento especial para a aquisição do equipamento. O responsável mencionou que não estava presente no laboratório no momento da compra do cromatógrafo, além de afirmar que não tinha ciência sobre a exigência de medidas específicas de

controle radiológico para esse tipo de fonte.

Em relação ao monitoramento da exposição à radiação, foi dito que nenhuma medição desse tipo foi realizada até o momento, nem há exigência do uso de dosímetros individuais para os usuários do laboratório. Segundo o relato, essa ausência de monitoramento se justifica pelo fato de o detector emitir radiação beta de curto alcance, o que reduziria significativamente os riscos de exposição para os operadores.

Sobre levantamentos radiométricos ao redor do equipamento, o responsável afirmou que nenhuma medição foi realizada, seja com detectores do tipo Geiger ou outro tipo de monitor de área. Isso indica que não há um histórico de avaliação da radiação emitida pelo cromatógrafo no ambiente, o que poderia ser um ponto de atenção, especialmente para garantir que os níveis de emissão estejam de fato dentro dos limites considerados seguros.

Quanto à existência de áreas controladas ou restritas, foi informado que não há uma delimitação específica. O acesso ao laboratório como um todo é controlado, mas não há qualquer isolamento adicional para a área onde se encontra o cromatógrafo com o detector de captura de elétrons (GC-ECD). Dessa forma, o equipamento está instalado em um ambiente de uso geral dentro do laboratório, sem barreiras adicionais para evitar aproximação indevida.

4.6.3 Departamento de Ciências Fisiológicas

Em relação ao isótopo H-3 presente no Departamento de Fisiologia de acordo com a Tabela 6, sua atividade de menos que $3\mu Ci$ - ou $1,11 \cdot 10^5$ kBq- é cerca de 0,1% de seu nível de isenção, 10^6 . Seu valor A/D é $0,55 \cdot 10^{-7}$, com $D = 2 \cdot 10^{12}$ kBq, apontando que seu risco em situações de exposição não planejada seria muito baixo.

4.7 Sugestões e Próximos Passos

Com um panorama geral sobre a atual posição da Universidade perante temas como a proteção radiológica no campus, uma série de medidas podem ser sugeridas. Dentre elas temos:

Aumento de atividade da Comissão Permanente de Proteção Radiológica (CPRP): Acredita-se que seria de grande benefício a reestruturação da CPRP e o aumento de sua atividade, de forma a atuar continuamente na regulamentação e monitoramento da radioproteção no campus, promovendo levantamentos regulares e atualizações nas indicações de segurança.

Melhoria na comunicação entre unidades acadêmicas: Estabelecer uma rede de informações unificada para catalogar a maior parte das fontes de radiação presentes nos laboratórios, facilitando a rastreabilidade e garantindo o cumprimento das diretrizes nacionais. Além disso, esse histórico de fontes permitiria um maior amparo legal para futuras gestões, a independência do ano de aquisição das fontes, sendo possível rastrear seu caminho desde a compra até o possível recolhimento.

Otimização do armazenamento de fontes radioativas: Reduzir o acúmulo de fontes não utilizadas, redistribuindo-as de maneira estratégica e, principalmente, segura, entre diferentes locais para evitar exceder os limites de isenção estabelecidos pela CNEN. Para melhorar a segurança, sugere-se armazenar essas fontes em locais de menor fluxo de pessoas, como oficinas ou salas de acesso ainda mais restrito que as situadas atualmente. Importante ressaltar o contraponto de que, um armazenamento mais esparsos pode criar um problema de gerenciamento de estoque destas fontes, abrindo possibilidades de perda ou descarte impróprio sem ser percebido facilmente.

Revisão da necessidade de fontes armazenadas: Muitos laboratórios acumulam radioisótopos e fontes sem previsão de uso futuro. Deve-se avaliar a real necessidade desses materiais e promover a devolução ou o descarte seguro daqueles que não forem mais utilizados. Ainda assim, entende-se que, devido ao grande caminho orçamentário e burocrático a ser tomado para aquisição das fontes, desfazer-se de isótopos já possuídos, mesmo que sem uso, possa ser um tema delicado.

Projeto informativo sobre radioproteção: Seria recomendável a elaboração de um informativo claro e acessível sobre radioproteção e procedimentos de emergência nos laboratórios da universidade que utilizam fontes de radiação ionizante. Esse material reforçaria os princípios fundamentais da proteção radiológica, como tempo, distância e blindagem, além de estabelecer protocolos objetivos para lidar com incidentes associados à radiação, garantindo uma resposta ágil e eficaz.

Para emergências, o informativo deveria detalhar as ações imediatas, incluindo o isolamento da área, a evacuação segura e a comunicação rápida com os responsáveis pela

segurança radiológica. No caso de ingestão ou inalação acidental de material radioativo, orientações sobre a busca por atendimento médico especializado e a realização de biodosimetria seriam essenciais. A inclusão de gráficos ilustrativos e fluxogramas de decisão tornaria a consulta mais intuitiva, e a disponibilização do material tanto em formato impresso quanto digital incentivaria a adesão às diretrizes, promovendo uma cultura de segurança na universidade.

5 Conclusão

Os resultados deste estudo revelaram um panorama complexo quanto à conformidade das práticas de proteção radiológica nos laboratórios da Universidade de Brasília. O principal ponto identificado foi a ausência de uma política centralizada e integrada para o gerenciamento de fontes radioativas e geradores de radiação ionizante.

Atualmente, cada laboratório é responsável por si, operando de forma descentralizada e com controle limitado. Essa estrutura fragmentada dificulta a criação de um inventário confiável dos equipamentos e materiais radioativos presentes no Campus, sendo a única lista disponível aquela gerida pela Secretaria do Meio Ambiente (SeMA), no âmbito do programa de recolhimento de resíduos. Essa realidade compromete a rastreabilidade, dificulta o monitoramento contínuo e pode acarretar consequências à segurança e à eficiência das práticas de proteção radiológica.

Além disso, verificou-se que, nos laboratórios de ensino, as atividades de algumas fontes radioativas extrapolam os limites de isenção estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Não foi possível rastrear se houve concessão de isenção por parte da comissão no momento do licenciamento. Apenas duas dessas fontes são efetivamente utilizadas em experimentos, enquanto o restante permanece estocado por uma lógica de retenção preventiva — na expectativa, mas sem previsão, de uso futuro para atividades do laboratório. Essa prática resulta no acúmulo desnecessário de material radioativo e no aumento da atividade somada dos radioisótopos, estes, armazenados em um só local.

Em relação à avaliação dos níveis de exposição, os levantamentos radiométricos realizados indicaram que as doses mensuradas estão, em geral, dentro dos limites estabelecidos pela CNEN, inclusive considerando os critérios para isenção regulatória, de $10 \mu Sv$ por ano. Apesar desse resultado positivo, deve-se ressaltar que o levantamento foi realizado de forma precária e carece do rigor técnico necessário para validação legal ou científica.

Ressalta-se que estudos radiométricos conduzidos por empresas especializadas e devidamente qualificadas seriam indispensáveis para garantir uma análise mais confiável e robusta, capaz de subsidiar decisões regulatórias e operacionais.

Além dos aspectos práticos levantados no trabalho, também se explorou a trajetória histórica da proteção radiológica, destacando sua evolução desde o início do século XX até sua consolidação contemporânea como uma área multidisciplinar, fundamentada em sólidos princípios científicos. A análise dos mecanismos de interação da radiação com a matéria e os efeitos biológicos da exposição revelou uma justificativa técnica, ética e

científica robusta para a implementação de medidas rigorosas de proteção. Embora muitas vezes vistas como excessivamente burocráticas, essas medidas refletem décadas de evidências que demonstram os riscos associados à radiação ionizante, incluindo danos determinísticos e estocásticos, mesmo em níveis considerados baixos.

O estudo aponta, assim, para a necessidade de reformulação no gerenciamento das práticas radiológicas na universidade. Recomenda-se a centralização do controle das fontes radioativas e dos aparelhos geradores de radiação ionizante em um sistema unificado e acessível ao usuário, com a criação de um inventário oficial que permita a rastreabilidade e o monitoramento regular. Paralelamente, poderiam ser estabelecidos critérios claros e padronizados para a aquisição, uso, armazenamento e descarte de fontes radioativas, reduzindo o acúmulo desnecessário e otimizando os recursos disponíveis.

Outro aspecto a ser implementado refere-se à disseminação de informações sobre o tema, não apenas para os profissionais responsáveis pelas fontes, mas também para os alunos de iniciação científica (ICs) e técnicos, visando ampliar a adoção de boas práticas no campus.

Por fim, este trabalho evidencia que a proteção radiológica não deve ser encarada apenas como uma exigência regulatória, mas como um elemento essencial para a segurança ocupacional, a saúde pública e a sustentabilidade ambiental no contexto acadêmico. A implementação de ações integradas, baseadas em uma perspectiva preventiva, será fundamental para alinhar a realidade dos laboratórios universitários às diretrizes da CNEN e aos princípios éticos da proteção radiológica, assegurando que o ambiente acadêmico possa continuar a desempenhar seu papel científico e educacional com responsabilidade e segurança.

Referências

- AGENCY, I. A. E. *Radiation Biology*. [S.l.]: IAEA, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 59.
- ARENA, C. et al. Space radiation effects on plant and mammalian cells. *Acta Astronautica*, v. 104, p. 419–431, 11 2014. Citado na página 56.
- ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 37, 39 e 48.
- BAATOUT, S. *Radiobiology Textbook*. [S.l.]: Springer Nature, 2023. ISBN 9783031188107. Citado 8 vezes nas páginas 29, 30, 36, 47, 50, 51, 52 e 53.
- BECQUEREL, H. Sur les radiations émises par phosphorescence. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, v. 122, p. 420–421, 1896. Citado na página 27.
- BRASIL, D. O. d. U. *EXTRATO DE TERMO ADITIVO N° 3/2024 - UASG 154040*. BRASIL: [s.n.], 2024. 62 p. Citado na página 90.
- CERRITO, L. *Radiation and detectors : introduction to the physics of radiation and detection devices*. [S.l.]: Springer, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 46.
- CHOPPIN, G. et al. *Radiochemistry and nuclear chemistry*. [S.l.]: Amsterdam Elsevier, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 41, 43, 49, 52 e 53.
- CLARKE, R.; VALENTIN, J. *The History of ICRP and the Evolution of its Policies*. Elsevier, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.
- CLEMENT, C. H.; PROTECTION, I. C. O. R. *ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs : threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context*. [S.l.]: Elsevier, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 57.
- CNEN. *CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear*. 2019. Disponível em: <<https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/orientacoes.asp>>. Citado na página 81.
- CNEN. *Relação de Equipamentos com Isenção de Requisitos de Proteção Radiológica*. 2019. Disponível em: <<https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/formularios/isencao/isencao-lista-equipamento.asp>>. Citado na página 83.
- CNEN. *Solicitação de Isenção dos Requisitos de Proteção Radiológica*. 2019. Citado na página 83.
- CNEN. *Guia para o Licenciamento e Controle de Instalações Radiativas de Baixo Risco (classificadas nos Grupos 3A, 4, 7A e exceções do Grupo 5)*. Versão 1.0. Divisão de Aplicações Médicas e de Pesquisa - DIAMP, 2020. Disponível em: <<https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/Licenciamento-e-Controle-de-Instalacoes-Ensino-e-Pesquisa-v2.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 81 e 82.

- CNEN. *Sobre a CNEN*. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/sobre-a-cnen#:~:text=%E2%80%9CGarantir%20o%20uso%20seguro%20e>>. Citado na página 65.
- CNEN, C. N. d. E. N. *NN 8.02 Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação*. 2014. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-8/grupo8-nrm802.pdf>>. Citado na página 90.
- CNEN, C. N. d. E. N. *NN 7.01 Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica*. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-nrm701.pdf>>. Citado na página 79.
- CNEN, C. N. d. E. N. *NN 6.02 Licenciamento de instalações radiativas*. 2022. Citado 5 vezes nas páginas 79, 80, 81, 82 e 97.
- CNEN, C. N. d. E. N. *NN 3.01 Requisitos Básicos De Radioproteção E Segurança Radiológica De Fontes De Radiação*. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/NormaCNENNN3.01.pdf>>. Citado 15 vezes nas páginas 9, 67, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 82, 83, 85, 100 e 104.
- CNEN, I. A. *CNEN - Instalações Autorizadas*. 2024. Disponível em: <https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/cons-ent-prof/lst-entidades-aut-cert.asp?p_ent=06&d=Laborat%F3rio%20de%20Pesquisa>. Citado na página 92.
- COPPEZ-ZANTINGA, A. R.; COPPEZ, M. J. The early years of radiation protection: a tribute to Madame Curie. *CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne*, v. 159, n. 11, p. 1389–91, 12 1998. ISSN 0820-3946. Citado na página 61.
- CURIE, P.; SKLODOWSKA-CURIE, M. Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende. *CR Acad. Sci. Paris*, v. 127, p. 175–178, 1898. Citado na página 28.
- DGP. *Decanato de Gestão de Pessoas - DSQVT*. 2015. Disponível em: <<https://dgp.unb.br/dsqvt>>. Citado na página 86.
- DPO. *Decanato de Planejamento; Orçamento e Avaliação Institucional - Relatório de Gestão*. 2019. Disponível em: <https://www.dpo.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=816>. Citado na página 91.
- DPO Decanato de Planejamento; Orçamento e Avaliação Institucional. *Organograma_UnB2019_Atualizado_dia_2019.12.30_-Atualização_DPG_e_SPI*. 2020. Disponível em: <<https://www.dpo.unb.br/>>. Citado na página 87.
- GIBBONS, J. P.; KHAN, F. M. *Khan's the physics of radiation therapy*. [S.l.]: Wolters Kluwer, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35, 37, 38 e 45.
- HALL, E.; GIACCIA, A. J. *Radiobiology for the Radiologist*. 2018. Citado 5 vezes nas páginas 53, 55, 57, 58 e 59.
- HALL, E. J.; GIACCIA, A. J. *Radiobiology for the radiologist*. 7. ed. [S.l.]: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2012. Citado na página 57.

- HALPERIN, E. C. et al. *Perez & Brady's Principles and Practice of Radiation Oncology*. 7. ed. [S.l.]: Wolters Kluwer, 2019. Citado na página 18.
- HAMADA, N.; AZIZOVA, T. V.; LITTLE, M. P. An update on effects of ionizing radiation exposure on the eye. *The British Journal of Radiology*, v. 93, n. 1115, p. 20190829, 11 2020. ISSN 0007-1285. Citado na página 18.
- IAEA. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. [S.l.]: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2014. ISBN 9789201353108. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.
- IAEA. *Safety standards / IAEA*. 2019. Disponível em: <<https://www.iaea.org/resources/safety-standards>>. Citado na página 63.
- ICNIRP. Principles for Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Physics*, v. 118, n. 5, p. 477–482, 5 2020. ISSN 1538-5159. Citado na página 29.
- ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, v. 21, n. 1-3, p. 1–201, 1991. ISSN 0146-6453. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 68.
- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Annals of the ICRP*, v. 37, n. 2-4, p. 9–34, 4 2007. ISSN 0146-6453. Citado 9 vezes nas páginas 18, 30, 50, 51, 58, 63, 69, 71 e 73.
- ICRP. Use of Dose Quantities in Radiological Protection. 2021. ISSN 0146-6453. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com>>. Citado 3 vezes nas páginas 59, 67 e 69.
- ICRP. *ICRP*. 2025. Disponível em: <<https://www.icrp.org/page.asp?id=3>>. Citado na página 64.
- ICRU. *Objectives – ICRU*. 2025. Disponível em: <<https://www.icru.org/about-icru/objectives/>>. Citado na página 65.
- KNOLL, G. F. *Radiation detection and measurement*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Cop, 2010. Citado na página 37.
- LEE, S.-Y. Concepts, Quantities, Units and Terminology for Non-ionizing Radiation. *null*, 1995. Citado na página 29.
- LOURENÇO, J. et al. Environmental Radiobiology. In: . [S.l.: s.n.], 2023. p. 469–501. ISBN 978-3-031-18809-1. Citado na página 48.
- MAIA, A. L. M. C. et al. Plano de Radioproteção Local de armazenamento provisório de rejeitos radioativos da Universidade de Brasília. Citado 3 vezes nas páginas 91, 92 e 93.
- MAINPRIZE, J. G. et al. Effects of ionizing radiation exposure during pregnancy. *Abdominal Radiology*, v. 48, n. 5, p. 1564–1578, 3 2023. ISSN 2366-0058. Citado na página 58.
- MINOTTO, J.; ELBERN, M. K.; JACOBSEN, R. B. *PLANO DE RADIOPROTEÇÃO INSTITUTO DE FÍSICA*. [S.l.]: UFRGS, 2017. Citado na página 85.
- MÜSSIG, D. *Re-scanning in scanned ion beam therapy in the presence of organ motion*. Tese (Doutorado), 12 2013. Citado na página 52.

- National Army Museum. *Scientific Advances in the First World War*. 2014. Disponível em: <<https://ww1.nam.ac.uk/1248/news/scientific-advances-first-world-war/>>. Citado na página 62.
- NCRP. *NCRP Report 151 Structural shielding design and evaluation for megavoltage x-and gamma-ray radiotherapy facilities*. [S.l.], 2006. v. 26, n. 3, 349–349 p. Citado na página 18.
- NRC, N. R. C. *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 59.
- OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. *Física das radiações*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 30, 39 e 49.
- OLIVER, R. Seventy five years of radiation protection. *British Journal of Radiology*, v. 46, n. 550, 1973. ISSN 00071285. Citado na página 29.
- PAWLIK, T. M.; KEYOMARSI, K. Role of cell cycle in mediating sensitivity to radiotherapy. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, v. 59, n. 4, 2004. ISSN 03603016. Citado na página 55.
- PNIFE. *Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa*. 2025. Disponível em: <<https://pnipe.mcti.gov.br/>>. Citado na página 94.
- PODGORSAK, E. B.; SERVICE, S. O. *Radiation Physics for Medical Physicists*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 34, 36, 40 e 41.
- RADVANYI, P.; VILLAIN, J. The discovery of radioactivity. *Comptes Rendus. Physique*, v. 18, n. 9-10, p. 544–550, 11 2017. ISSN 1878-1535. Citado na página 27.
- Reitoria. *ATO DA REITORIA Nº 0151/2023*. 2023. Citado na página 89.
- Rollins W. X-Light Kills. *The Boston Medical and Surgical Journal*, v. 144, n. 7, p. 173–173, 2 1901. ISSN 0096-6762. Citado na página 61.
- ROOT, C. M. et al. A Mixed-methods Approach for Improving Radiation Safety Culture in Open-source University Laboratories. *Health Physics*, v. 118, n. 4, p. 427–437, 4 2020. ISSN 1538-5159. Citado na página 19.
- RUTHERFORD, E.; SODDY, F. XLI. The cause and nature of radioactivity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 4, n. 21, p. 370–396, 9 1902. ISSN 1941-5982. Citado na página 28.
- RUTHERFORD, E.; SODDY, F. LX. Radioactive Change. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 5, n. 29, p. 576–591, 5 1903. ISSN 1941-5982. Citado na página 29.
- SÁ, J. R. et al. Interação da Física das Radiações com o Cotidiano: uma prática multidisciplinar para o Ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 1, 10 2016. ISSN 1806-1117. Citado na página 33.
- SeMa. *SeMA - Procedimentos - Resíduos Perigosos*. 2023. Disponível em: <<http://sema.unb.br/res%C3%ADduos-perigosos>>. Citado na página 90.

- SEMA, S. d. M. A.; SEMA/CGR, C. d. G. d. R. *Procedimentos de Gerenciamento de Resíduos Perigosos na Universidade de Brasília*. [S.l.], 2022. Disponível em: <http://sema.unb.br/images/Noticias/2022/Procedimento_de_Gerenciamento_de_Resduos_Perigosos_da_UnB_-_ver_1.pdf>. Citado na página 90.
- SEVER, L. E. et al. A CASE-CONTROL STUDY OF CONGENITAL MALFORMATIONS AND OCCUPATIONAL EXPOSURE TO LOW-LEVEL IONIZING RADIATION. *American Journal of Epidemiology*, v. 127, n. 2, p. 226–242, 2 1988. ISSN 1476-6256. Citado na página 19.
- SHAPIRO, J. *Radiation protection : a guide for scientists, regulators, and physicians*. [S.l.]: Harvard University Press, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- SUREKA, C. S.; ARMPILIA, C. *Radiation biology for medical physicists*. [S.l.]: Crc Press, Taylor & Francis Group, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 51, 54, 57 e 59.
- TAUHATA, L. et al. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. 5. ed. Rio de Janeiro: IRD,CNEN, 2003. Citado 12 vezes nas páginas 35, 37, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 60, 67, 68 e 70.
- TAYLOR, H. R. et al. Corneal Changes Associated With Chronic UV Irradiation. *Archives of Ophthalmology*, v. 107, n. 10, 1989. ISSN 15383601. Citado na página 29.
- THOMSON, E. Roentgen Ray Burns. *Archives of The Roentgen Ray*, v. 3, n. 3, p. 88–88, 2 1899. ISSN 2053-1966. Citado na página 61.
- TURNER, J. E. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. [S.l.]: Wiley, 2007. ISBN 9783527406067. Citado na página 61.
- UNB. *PORTFÓLIO INFRAESTRUTURA DE PESQUISA E INOVAÇÃO*. 2024. Citado na página 94.
- Universidade de Brasília. *Relatório de Gestão da Universidade de Brasília*. [S.l.], 2019. 103–108 p. Citado na página 91.
- UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Anexo c. [S.l.]: UNITED NATIONS, 2008. v. 3. Citado na página 47.
- UNSCEAR. *Historical Milestones*. 2025. Disponível em: <<https://www.unscear.org/unscear/en/about-us/historical-milestones.html>>. Citado na página 64.
- VAISERMAN, A. et al. Health Impacts of Low-Dose Ionizing Radiation: Current Scientific Debates and Regulatory Issues. *Dose-Response*, v. 16, n. 3, p. 155932581879633, 7 2018. ISSN 1559-3258. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- VERSANT, P. *ALARA: The Gold Standard of Radiation Protection*. 2021. Disponível em: <<https://www.versantphysics.com/2021/04/08/alara-the-gold-standard-of-radiation-protection/>>. Citado na página 66.
- W. C. Röntgen. On a New Kind of Rays. *Nature*, v. 53, n. 1369, p. 274–276, 1 1896. ISSN 0028-0836. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- WAN, Y. et al. Current advances and future trends of hormesis in disease. *npj Aging*, v. 10, n. 1, p. 26, 5 2024. ISSN 2731-6068. Citado na página 59.

WILSON, G. D. *Radiation and the cell cycle, revisited*. 2004. Citado 2 vezes nas páginas [54](#) e [55](#).

WOJCIK, A.; HARMS-RINGDAHL, M. Radiation protection biology then and now. *International Journal of Radiation Biology*, v. 95, n. 7, p. 841–850, 7 2019. ISSN 0955-3002. Citado na página [18](#).