

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**GUIA PARA LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM SERVIÇOS DE
MEDICINA NUCLEAR**

STÉFANI DE ALMEIDA VILLA

Porto Alegre, 2021

Stéfani de Almeida Villa

GUIA PARA LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Física.

Orientadora: Dr.^a Fernanda Chiarello Stedile
Co-orientador: Físico Residente Profissional Leonardo Pessoa da Silva

Porto Alegre, 2021

AGRADECIMENTOS

Este trabalho apenas foi possível devido ao apoio incondicional dos meus pais, Eronilda e Lisberto, os quais permitiram que eu pudesse começar uma fase totalmente nova da minha vida em outra cidade a quase 300 km de distância de onde eles me ensinaram todos os valores e princípios que carrego comigo. Também gostaria de agradecer aos amigos que fiz durante esses anos de universidade, principalmente ao pessoal da sala de extensão e do “mó good vibes”, com um agradecimento especial a Cristiane, Daniela, Isadora, Júlio, Thaís e Vitor. A presença diária dessas pessoas, me apoiando, consolando, comemorando junto comigo, foi imprescindível para que eu chegasse até o momento em que escrevi esse agradecimento. Por fim, quero agradecer ao pessoal do Serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre, à minha orientadora Fernanda e ao meu co-orientador Leonardo, que me auxiliaram e guiaram nesses meses em que aprendi sobre uma área da Física que nunca havia tido contato antes.

RESUMO

Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs) em Serviços de Medicina Nuclear podem ser expostos prolongadamente à radiação ionizante devido aos abrigos de fontes radioativas que existem no local e à circulação de pacientes que em quem foram administrados radiofármacos, os quais também emitem radiação. Portanto, neste trabalho, foi construído um guia para auxiliar a realização de levantamentos radiométricos onde são medidos pontos em todo o Serviço. Para isso, foram usados quatro trabalhos de referência e um levantamento feito no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA). Para o levantamento do HCPA, foram selecionados 47 pontos de medição e, para fazer as leituras de taxa de dose, foi usado um contador Geiger RadEye B20 da ThermoFisher no modo de aquisição *scaler* por 1 minuto. As medidas foram feitas com a presença de pacientes no Serviço. A partir das taxas de dose medidas, foi calculado qual a carga horária máxima, mensal e anual, que um IOE poderia permanecer ou transitar pelos pontos selecionados até atingir os níveis de investigação estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Em 8 pontos essa carga horária precisa ser menor que a correspondente aos demais pontos.

ABSTRACT

Occupational workers in Nuclear Medicine facilities can be frequently exposed to ionising radiation due to storage of radioactive sources in the premises and to the presence of patients that were administered radioactive compounds, and, therefore, emit ionising radiation. In this work, a guide was prepared to help in the conduction of radiometric surveys in defined areas of the medical facility where increased radiation levels are expected. Four reference articles were taken in consideration to write this guide as well as a survey carried out in the Nuclear Medicine facility of Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA). For the survey in HCPA, 47 points of measurement were defined and, to obtain the dose rate readings, a Geiger RadEye B20 counter from ThermoFisher, in the scaller acquisition mode, was used. The readings were taken in the presence of patients during 1 minute each. The maximum workloads, monthly and yearly, that any occupational worker may stay in a given facility location, until reaching the investigation levels established by the National Nuclear Energy Commission (CNEN, in Portuguese) were estimated, based on the dose rate readings. Results showed that maximum workload values need to be reduced in eight positions within the facility when compared to all other selected points for dose rate measurements.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 DECAIMENTO RADIOATIVO	8
1.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE RAIOS X	10
1.3 INTERAÇÃO DO FÓTON COM A MATÉRIA	11
1.4 GRANDEZAS RADIOLÓGICAS	12
1.5 GRANDEZAS OPERACIONAIS	16
1.6 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO	18
1.7 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	19
2. OBJETIVOS	22
3. METODOLOGIA	23
3.1 DETECTOR GEIGER-MÜLLER	24
3.2 METODOLOGIA DOS TRABALHOS DE REFERÊNCIA	25
4. LEVANTAMENTO E MAPEAMENTO RADIOMÉTRICO NO HCPA	27
4.1 DISCUSSÃO	33
5. GUIA PARA A REALIZAÇÃO DE LEVANTAMENTOS RADIOMÉTRICOS ..	34
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

Desde que Wilhelm Röntgen (1845–1923) descobriu o raio X em 1895 e radiografou a mão de sua esposa, o potencial médico de tal procedimento se tornou evidente. Nos quatro anos seguintes, Henri Becquerel (1852–1908) descobriu a radioatividade e Pierre e Marie Curie (1859–1906 e 1867–1934, respectivamente) descobriram o polônio e o rádio, além de isolarem alguns radionuclídeos. Em 1897 foi criada a Sociedade de Röntgen, a primeira sociedade radiológica do mundo, admitindo tanto médicos como físicos. Os efeitos dessas radiações ionizantes ficaram aparentes desde o início, a ponto de em 1898 essa sociedade estabelecer um comitê sobre lesões provindas de raios X, já iniciando uma disciplina de proteção radiológica. Em 1927, a Sociedade Röntgen foi incorporada ao Instituto Britânico de Radiologia. [1]

No ano de 1910, imageamento e radioterapia usando raios X e o rádio já estavam estabelecidos e logo surgiram novas tecnologias para melhorar a qualidade das imagens obtidas e para padronizar os tratamentos. A medicina nuclear foi a última peça a se encaixar no que hoje conhecemos como física médica, ocorrendo o primeiro imageamento com rastreadores radioativos apenas em 1939. O primeiro radioisótopo a ser utilizado clinicamente foi o ^{131}I para realizar investigações na tireóide. [1]

Atualmente, o conceito de radiação é o transporte de energia por ondas eletromagnéticas ou por partículas atômicas e pode ser classificada em duas categorias: radiação não-ionizante e radiação ionizante. A primeira carrega uma energia menor que o potencial ionizante dos átomos e a segunda possui energia suficiente para remover um elétron de um átomo ou molécula [2]. Para a Física Médica, ambas são utilizadas: ionizantes e não ionizantes. Além disso, as radiações ionizantes com baixo potencial de penetração também são usadas, como a radiação alfa.

A Medicina Nuclear é baseada no princípio do rastreamento, o qual "estuda o destino de compostos in vivo usando pequenas quantidades de rastreadores

radioativos que não vão gerar nenhuma resposta farmacológica pelo corpo aos rastreadores". Atualmente, esse princípio é usado para estudar vários aspectos fisiológicos, como metabolismo celular e funcionamento dos órgãos. Quantidades maiores desses radionuclídeos são utilizadas para tratar pacientes com doenças disseminadas. A medicina nuclear também é referida como "imageamento funcional", já que são feitas sequências de imagens ao longo do tempo para mostrar o percurso temporal do rastreador no corpo e, assim, varrer a distribuição do composto na região de interesse. [2]

Porém, para que essas práticas possam ser realizadas, é preciso que haja profissionais da saúde adequadamente treinados para tal, os chamados indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs) e que tenham conhecimento sobre os possíveis efeitos biológicos que a exposição a essa radiação pode trazer. [3]

Assim, trabalhar em um Serviço de Medicina Nuclear implica em um risco significativo devido às suas condições específicas, como a presença de fontes de radiação, pacientes que foram administrados com radionuclídeos e se tornam também fontes de radiação e a grande quantidade de tempo que os IOEs passam nesses ambientes. [4]

1.1 DECAIMENTO RADIOATIVO

O decaimento radioativo, também chamado de radioatividade, é um processo espontâneo em que um núcleo-pai instável emite uma partícula ou radiação eletromagnética e se transforma em outro núcleo-filho que pode ou não ser estável.

Se o núcleo-filho for instável, também decairá em uma série de decaimentos até se tornar um núcleo estável.

Todos os processos de decaimento são governados pelo mesmo formalismo baseado na definição de Atividade $A(t)$ e em um parâmetro característico de cada processo, a constante de decaimento λ , cuja unidade é s^{-1} . Desse modo, a

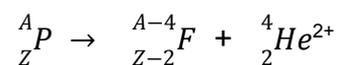
Atividade de uma substância contendo um número N de átomos radioativos idênticos representa o número total de desintegrações por unidade de tempo:

$$A(t) = \lambda N(t) \quad (1)$$

A unidade da Atividade é o Becquerel (Bq), que é definida como uma desintegração por segundo. [2]

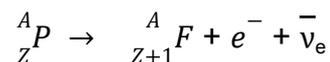
- **Decaimento α**

Um núcleo-pai (P) decai em um núcleo-filho (F) mais estável ao emitir uma partícula α , que é um núcleo de ${}^4\text{He}$. Assim, o número atômico (Z) do núcleo-pai diminui em dois e o número de massa (A) diminui em quatro:



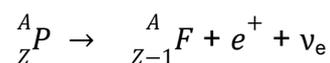
- **Decaimento β^-**

Um núcleo-pai rico em nêutrons transforma um nêutron em um próton e emite uma partícula β^- (um elétron) e um antineutrino do elétron:



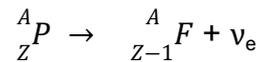
- **Decaimento β^+**

Um núcleo-pai rico em prótons transforma um próton em um nêutron e emite uma partícula β^+ (um pósitron) e um neutrino do elétron:



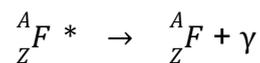
- **Captura de elétron**

A captura de elétron pode ocorrer quando um elétron passa muito perto do volume do núcleo, sendo capturado por um próton. Isso gera uma transformação do próton em um nêutron e um neutrino do elétron é emitido:



- **Decaimento γ e conversão interna**

Quando o núcleo-pai decai em um núcleo-filho de estado excitado sem ter gasto toda a energia disponível para o decaimento, o núcleo-filho pode decair instantaneamente ou depois de algum tempo relativamente curto (estado metaestável isomérico) por meio de um desses dois processos: emitindo a energia na forma de fótons γ ou transferindo essa energia para um dos elétrons, geralmente da camada K, o qual é ejetado. Caso a segunda opção ocorra, outro elétron transita de uma camada mais externa para ocupar o espaço do elétron ejetado. Esse processo é chamado de conversão interna.



- **Elétrons Auger**

Quando acontece a conversão interna ou a captura de elétrons, energia é emitida a partir da transição do elétron para ocupar a lacuna do elétron ejetado. Essa energia pode ser transferida não radiativamente para outro elétron de uma camada mais externa, e esse elétron é emitido com uma energia equivalente à diferença entre a energia transferida e a sua energia de ligação. Esses elétrons ejetados são chamados de elétrons Auger em homenagem a Pierre Victor Auger (1899-1993) que descobriu o fenômeno em 1923. Entretanto, vale ressaltar que Lise Meitner (1878-1968) observou e publicou o mesmo processo no ano anterior, em 1922. Ambos fizeram seus estudos independentemente. [2]

1.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE RAIOS X

- **Raios X característicos**

Os núcleos que decaem por captura de elétrons ou conversão interna deixam uma lacuna nas camadas mais interiores dos átomos, a qual é ocupada por um elétron de uma camada mais externa. A energia emitida

nessa transição é a equivalente à diferença de energia entre as camadas e geralmente está no espectro do raio-X. Como cada camada de cada núcleo tem uma energia potencial única, os raios X emitidos são chamados de característicos pois caracterizam o núcleo da sua origem. [2]

- **Raios X de frenamento (Bremsstrahlung)**

Quando partículas carregadas são desaceleradas devido à interação com outras partículas carregadas, a energia cinética perdida é convertida em radiação eletromagnética. O espectro dessa radiação é contínuo, variando entre zero e a energia cinética inicial da partícula carregada. [2]

1.3 INTERAÇÃO DOS FÓTONS COM A MATÉRIA

Quando os fótons produzidos pelos processos descritos na seção anterior penetram um material, eles podem sofrer diversos tipos de interação com os átomos presentes. Se um feixe de fótons é irradiado em um certo material, a intensidade desse feixe diminuirá devido a essas interações, ou seja, será atenuado. Essa atenuação ocorre de acordo com a seguinte equação: [2]

$$I(x) = I(0)e^{-\mu x} \quad (2)$$

em que I é a intensidade do feixe, x é a espessura do material e μ é o coeficiente de atenuação que depende do material.

- **Efeito fotoelétrico**

No efeito fotoelétrico, o fóton interage com um elétron fortemente ligado, ou seja, de camadas interiores, e o elétron é ejetado com energia E_K dada por

$$E_K = E_f - E_L \quad (3)$$

em que E_f é a energia do fóton incidente e E_L é a energia de ligação do elétron ao átomo.

Para que o efeito aconteça, a energia do fóton deve ser maior que a energia de ligação do elétron, e há uma maior probabilidade de o efeito ocorrer se ambas as energias forem similares. [2]

- **Espalhamento Rayleigh**

Nesse processo considerado elástico, o fóton é apenas espalhado em um ângulo relativamente pequeno, sem transferência de energia para outras partículas e sua própria energia também se mantém essencialmente a mesma. [2]

- **Efeito Compton**

O efeito Compton é uma interação entre o fóton e um elétron fracamente ligado, em que a energia do fóton é muito maior que a energia de ligação do elétron. O fóton transfere parte de sua energia ao elétron e é espalhado em um certo ângulo θ , enquanto o elétron é ejetado do átomo com ângulo ϕ . [2]

- **Produção de Pares**

Quando a energia do fóton incidente é maior que 1.022 MeV, torna-se possível a produção de um par elétron-pósitron a partir da absorção completa do fóton incidente. Para o efeito ocorrer, a energia total, a carga e o momentum devem ser conservados simultaneamente, necessitando, assim, que o efeito aconteça apenas na presença de um campo elétrico coulombiano que retém uma fração do momentum carregado pelo fóton. [2]

1.4 GRANDEZAS RADIOLÓGICAS

- **Exposição (X):**

É a soma das cargas elétricas dos íons de mesmo sinal produzidos no ar quando os elétrons gerados pelos fótons incidentes em um volume elementar de ar, com certa massa, são completamente parados no ar. [5]

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (4)$$

A unidade é o Röntgen (R), definida como a quantidade de radiação X ou γ que produz uma unidade eletrostática de carga em uma massa de ar correspondente a 1 cm³ de ar. [5]

- **Dose Absorvida (D)**

A energia transferida pela radiação incidente nem sempre é totalmente absorvida pelo meio. A fração absorvida será correspondente às ionizações, quebra de ligações químicas e ao aumento da energia cinética das partículas (calor). [3]

Sendo assim, a Dose Absorvida representa a energia média absorvida E em um meio de interesse de massa dm .

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (5)$$

A unidade é o Gray (Gy), que corresponde a $J kg^{-1}$.

- **Equivalente de Dose (H)**

O dano biológico causado por raios X, raios γ e elétrons é aproximadamente proporcional à energia depositada. Entretanto, essa proporcionalidade não se mantém para partículas com maior poder de ionização, como as partículas α . [5]

Assim, foi definida a grandeza de Equivalente de Dose como aquela equivalente à dose absorvida em um ponto de interesse ponderada por um fator de qualidade Q, o qual reflete a habilidade daquele tipo de radiação de causar danos.

$$H = D \cdot Q \quad (6)$$

A unidade é o Sievert (Sv), definida como $J kg^{-1}$. Essa unidade tem a mesma definição de Gy devido ao fato da diferença entre a grandeza de Dose Absorvida e Equivalente de Dose ser um fator adimensional.

Os valores de Q para cada tipo de radiação estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 1: Valores para fator de qualidade Q. [5]

Tipo de Radiação	Fator de Qualidade (Q)
Raios X, Raios γ , elétrons	1
Prótons de alta energia	10
Nêutrons de energia desconhecida	20
Partículas α , Produtos de Fissão	20

- **Dose equivalente (H_T)**

É de interesse da proteção radiológica a estimativa da dose absorvida média em todo o tecido ou órgão - não apenas em um ponto de interesse -, ponderada pela qualidade da radiação [5]

$$H_T = \sum_R D_{TR} \cdot w_R \quad (7)$$

Na equação acima, D_{TR} é a dose absorvida média em um órgão ou tecido T devido à radiação R e w_R é o fator de peso ou de ponderação da radiação, sendo função do tipo e energia da radiação incidente ou emitida por uma fonte interna e relacionado com efeitos estocásticos a baixas doses. A unidade dessa grandeza também é o Sv. Os valores de w_R são compatíveis com os de Q, como é apresentado na tabela abaixo.

Tabela 2: Valores para o fator de ponderação w_R [7]

Tipo de Radiação e energia	w_R
Fótons de todas as energias	1
Elétrons e múons de todas as energias	1
Nêutrons com energia E: E < 10 keV 10 keV ≤ E ≤ 100 keV 100 keV < E ≤ 2 MeV 2 MeV < E ≤ 20 MeV E > 20 MeV	5 10 20 10 5
Prótons (exceto os de recuo) E > 2 MeV	5
Partículas α, fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

- **Dose Efetiva (E)**

A Dose Efetiva é a soma dos produtos de todas as doses equivalentes pelos respectivos fatores de ponderação do órgão ou tecido irradiado w_T , ou seja, expressa a média aritmética ponderada das doses equivalentes nos diversos tecidos ou órgãos. [5]

$$E = \sum_T H_T \cdot w_T \quad (8)$$

Valores do fator de ponderação para diferentes órgãos ou tecidos estão na tabela abaixo.

Tabela 3: Fatores de ponderação de órgão ou tecido w_T [7]

Órgão	w_T
Gônadas	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12
Cólon ^(a)	0,12
Pulmão	0,12

Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Superfície óssea	0,01
Restante ^(b)	0,05

(a) Região torácica da área respiratória

(b) Para fins de cálculo, o grupo de tecidos restantes é composto das glândulas suprarrenais, cérebro, região extratorácica da área respiratória, intestino delgado, rim, músculo, pâncreas, baço, timo e útero. Nos casos em que um dos tecidos remanescentes mais expostos receba uma dose equivalente mais alta dentre todos os órgãos, deve-se aplicar um fator de peso de 0,025 a esse tecido ou órgão e um fator de 0,025 ponderado por massa aos demais restantes.

O termo *dose efetiva* substitui o termo *dose equivalente efetiva*, que era usado pela ICRP (Comissão Internacional de Proteção Radiológica, em inglês).

1.5 GRANDEZAS OPERACIONAIS

Com a finalidade de facilitar as avaliações, comparações e registros, é desejável que haja uma única grandeza para medir as exposições dos indivíduos. Dentre as grandezas citadas acima, a Dose Equivalente é a mais conveniente por abarcar a dose absorvida, o tipo de radiação e permite uma correlação com o risco de dano biológico. Entretanto, essa grandeza não é mensurável diretamente nem de fácil estimativa. Assim, a ICRU (Comissão Internacional de Unidades e Medições de Radiação, em inglês), no ano de 1980, propôs uma esfera de 30 cm de diâmetro

feita de material tecido-equivalente e densidade de 1 cm/g^3 , com composição química, em massa, de 76,2% de oxigênio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogênio e 2,6% de nitrogênio, a fim de simular o tronco humano. Desse modo, um valor medido na esfera deve ser considerado como medido em um ser humano. Também foi necessário introduzir as características do campo de radiação ao qual essa esfera estaria exposta, as quais foram definidas como campo expandido e campo expandido e alinhado. [3]

O campo expandido é um campo de radiação homogêneo, onde a fluência (número de partículas incidentes sobre uma seção de área de uma esfera) e as distribuições de energia e direcional são iguais às de um campo de radiação real em um ponto P de referência. Já no campo expandido e alinhado a fluência e distribuição de energia são as mesmas que as do campo expandido, mas a distribuição angular da fluência é unidirecional, assim, a medida do equivalente de dose em qualquer ponto da esfera não depende da distribuição direcional de um campo de radiação real. [3]

A grandeza de equivalente de dose ambiente vincula a irradiação externa com a dose efetiva, sendo usada para monitoração de área. É a medida do equivalente de dose produzido pelo correspondente campo expandido e alinhado na profundidade d da esfera ICRU. A unidade também é Sv.

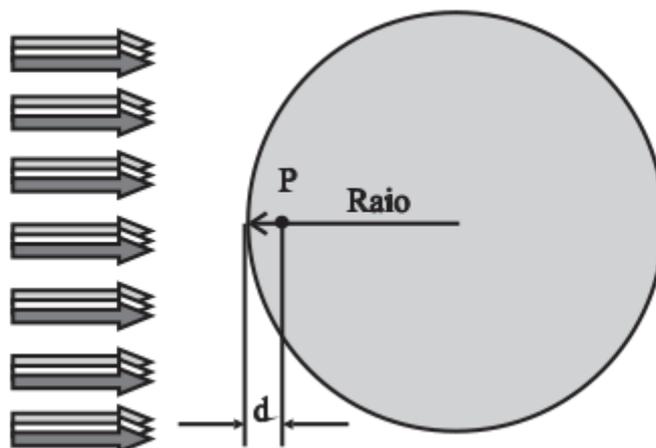


Figura 1: Esquema da irradiação da esfera ICRU e o ponto de referência P na profundidade d onde a grandeza equivalente de dose ambiente é determinada.

Para radiações fortemente penetrantes, é usado a profundidade de 10 mm. Para radiações fracamente ionizantes, é utilizado a profundidade de 0,07 mm para a pele e de 3 mm para o cristalino. [3]

1.6 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO

A exposição à radiação ionizante pode acarretar em sérios danos ao corpo, pois os íons reativos provindos das quebras nas ligações químicas das células podem causar lesões no ácido desoxirribonucleico (DNA, em inglês) e se não houver reparação, é possível que ocorra a morte celular não controlada, levando à patologia do tecido. Se a reparação do DNA for defeituosa, pode haver uma mutação não letal que, se não for eliminada pelo sistema imunológico, pode levar ao câncer em células somáticas ou à anomalia genética em células germinais. [3]

Essa exposição pode ocorrer de forma única (exames radiológicos), fracionada (no caso de tratamento radioterápico) ou periodicamente (como em exposições ocupacionais). Portanto, os efeitos biológicos causados por radiação ionizante podem ser diferentes para uma mesma quantidade de radiação dependendo de como a exposição acontece. Por exemplo, “se ao invés de fracionada, a dose aplicada num paciente em tratamento de câncer, fosse dada numa única vez, a probabilidade de morte seria muito grande”. [3]

Os efeitos biológicos da radiação podem ser classificados em: [3]

- Efeitos estocásticos: A probabilidade de ocorrência desses efeitos é proporcional à dose recebida, não havendo um limiar. Ou seja, doses abaixo daquelas recomendadas também podem induzir esses efeitos.
- Efeitos determinísticos: Causam “um grau de morte celular não compensado pela reposição ou reparo, com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão”. Há um limiar de dose. A probabilidade desses efeitos para doses abaixo desse limiar é nula e para doses acima, a probabilidade é de 100% com a severidade do dano aumentando de acordo com a dose aplicada.

- Efeitos somáticos: São efeitos que aparecem na própria pessoa que foi irradiada, causados por danos nas células. Depende da taxa de absorção da energia da radiação e da dose absorvida, bem como da região e da área do corpo exposta.
- Efeitos genéticos ou hereditários: Esses efeitos ocorrem nos descendentes da pessoa irradiada, causados por danos nos órgãos reprodutores. Não dependem da taxa de absorção da dose e são cumulativos.
- Efeitos imediatos: Ocorrem em poucas horas ou semanas após a exposição. Predominam em doses altas, que podem causar lesões letais, e intermediárias, causando danos menos severos e não necessariamente permanentes.
- Efeitos tardios: São os efeitos que se revelam anos ou décadas após a exposição, como o câncer.

1.7 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

O conceito de proteção radiológica é de extrema importância, o qual dita um conjunto de medidas para prevenir que possíveis efeitos biológicos sejam causados pela radiação ionizante [3]. A proteção radiológica se sustenta por dois pilares principais: seus princípios e fatores.

Os princípios da proteção radiológica são: [5]

- Justificação: A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) não aceitará nenhuma prática ou fonte associada à prática que não traga benefícios para quem está sendo exposto ou para a sociedade. Ou seja, "qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas" [3].

- Otimização: Qualquer prática que envolva exposição à radiação deve seguir o princípio ALARA (tão baixa quanto razoavelmente exequível, em inglês), ou seja, deve ser otimizada de acordo com fatores sócio-econômicos. Essa otimização pode ocorrer por meio de análises quantitativas, como o emprego de técnicas de ajuda para tomadas de decisões, ou por meio de análises qualitativas, desde que essa análise determine quais medidas de proteção serão otimizadas, levando em consideração as opções disponíveis e a natureza da exposição, e estabeleça critérios para restringir valores de exposição.
- Limitação de dose individual: A exposição deve ser restringida de tal modo que as doses a seguir não excedam os limites de dose estabelecidos pela Norma CNEN-NN-3.01 [6]

Tabela 4: Limitação de dose individual [6]

Limites de Dose Anuais ^(a)			
Grandeza	Órgão	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE)	Indivíduo do Público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^(b)	1 mSv ^(c)
Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv ^(b)	15 mSv
	Pele ^(d)	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

(a) Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

(b) Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

(c) Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

(d) Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

Além disso, nenhum IOE deve ser exposto à radiação sem que seja necessário, nem que não tenha conhecimento dos riscos radiológicos ou que não esteja adequadamente treinado para desempenhar seguramente suas funções.

Seguindo os princípios da proteção radiológica, é preciso estabelecer seus fatores, que constituem o controle da exposição: [5]

- Tempo de exposição: Reduzir o tempo de permanência em áreas onde há fontes de radiação ionizante previne o acúmulo desnecessário de dose.
- Distância da fonte: Aumentar a distância entre o indivíduo e a fonte de radiação ionizante é uma forma de minimizar a exposição.
- Blindagem: Se, após o mínimo tempo de exposição possível e a máxima distância, os níveis de radiação permanecerem altos, é necessário usar acessórios para atenuar a exposição. O material adequado e sua espessura dependem do tipo e intensidade da radiação e do valor de dose aceitável após a blindagem.

Além dos limites de dose individuais, a Posição Regulatória 3.01/004:2011 da CNEN [8] estabelece o nível de registro de 0,10 mSv (dose efetiva) para monitoração mensal do IOE. A Posição também determina o nível de investigação, que são valores que, quando atingidos, deve haver uma investigação dos fatos que levaram à detecção desse nível e as possíveis consequências. Os valores são de 6 mSv por ano ou 1 mSv por mês em dose efetiva e para dose equivalente, estipula 150 mSv para pele, pés e mãos por ano ou 20 mSv em qualquer mês e para o cristalino, o limite é 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês.

A Norma CNEN NN 3.02 [9] afirma que em todo serviço de radioproteção deve haver um programa de monitoração de área, o qual deve selecionar locais mais críticos de áreas restritas com relação a todos os tipos de radiação, contaminação e acidentes possíveis; selecionar e marcar pontos de referência para realizar medições de campos de radiação, de modo que representem a detecção prévia de irregularidades e acidentes e a permanência e trânsito de trabalhadores, para efeito de estimativa de doses e indicação de alarmes.

A Norma CNEN NN 3.05 [10] estabelece também o nível de notificação à CNEN de 20 mSv ao ano ou 4 mSv em qualquer mês de dose efetiva acumulada e o limite de dose equivalente acumulada para mãos e pés de 500 mSv ao ano ou 40 mSv em qualquer mês. O Artigo 42 da mesma Norma determina que “deve ser realizado e registrado um levantamento radiométrico, com periodicidade máxima quinzenal, considerando todos os pontos de abrigo de fontes radioativas e o valor da radiação de fundo em área livre”. Entretanto, não é estabelecido nenhum procedimento de como esse levantamento deve ser feito de forma efetiva, nem uma metodologia de análise dos dados coletados.

2. OBJETIVOS

Inicialmente, este trabalho almejava realizar um levantamento radiométrico de taxa de dose no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA) e, a partir destas medidas, construir um mapa de calor (ou de cor) espacial com o objetivo de auxiliar os IOEs do Serviço a terem uma melhor visualização dos níveis de radiação do ambiente no qual exercem sua profissão e, desse modo, conseguirem evitar exposições desnecessárias à radiação ionizante. Haviam sido selecionados pontos de medição em todos os ambientes do Serviço, e seriam feitas pelo menos três medidas em cada ponto em dias e horários aleatórios para dias sem pacientes e dias com pacientes, totalizando seis medidas para cada ponto. A escolha de separar as medidas em dias com e sem pacientes é uma ideia para complementar a Norma CNEN NN 3.05, a qual determina que devem ser considerados “todos os pontos de abrigo de fontes radioativas”, porém durante a

rotina do serviço, além das fontes radioativas, existe a circulação e permanência de pacientes que estão sendo submetidos à terapia e diagnóstico com radiofármacos (pacientes injetados) que também emitem radiação ionizante. Portanto, é possível haver regiões de ambientes do Serviço onde há taxas de dose maiores devido a esses pacientes, as quais não são mensuradas durante os levantamentos radiométricos convencionais. Entretanto, devido à pandemia, questões burocráticas e a um período de falta de material radioativo no Serviço, foi possível realizar apenas uma medida em cada ponto para um dia com a presença de pacientes e foi construído um mapa espacial a partir dessas aferições.

Sendo assim, considerando a proposta inicial desse projeto e outros trabalhos que fizeram levantamentos e mapeamentos radiométricos, este trabalho tem como objetivo construir um guia de como realizar esses levantamentos em qualquer Serviço de Medicina Nuclear de maneira eficiente a fim de tornar a proteção radiológica otimizada, já que a CNEN determina que seja feita monitoração periódica apenas em locais de abrigos de fontes, sem mencionar locais de permanência/passagem de pacientes, e também não estabelece nenhum procedimento para realizar o levantamento.

A problemática apresentada foi idealizada por Leonardo Pessoa da Silva, Físico Residente Profissional da área de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre, enquanto que os métodos para a abordagem do problema foram definidos pela autora sob orientação da Profa. Dra. Fernanda Chiarello Stedile e do Leonardo.

3. METODOLOGIA

O guia teve como referência a metodologia de quatro trabalhos que realizaram levantamentos radiométricos e os aplicaram para construir um mapa de calor (ou de cor) espacial em dois Serviços de Medicina Nuclear e na seleção de pontos que foi feita inicialmente para o Serviço do HCPA, a qual também foi baseada nesses trabalhos.

3.1 DETECTOR GEIGER-MÜLLER

Para que um levantamento radiométrico possa ser feito, é necessário o uso de um detector de radiação. Um dos mais comumente usados devido à sua simplicidade, baixo custo e facilidade de operação é o contador Geiger-Müller, primeiramente construído por Hans Geiger e Walther Müller em 1928. O Geiger-Müller é um detector a gás operado em região de alta tensão (500-2000 V), e seu princípio de funcionamento se baseia nas ionizações que esse gás sofre devido à radiação incidente. Os elétrons liberados devido às ionizações aceleram por causa da alta tensão aplicada entre o cátodo e o ânodo e provocam ionizações secundárias nesse gás, assim como excitações. Os elétrons livres dessas ionizações secundárias e a radiação emitida quando os átomos excitados voltam ao estado fundamental podem ionizar novamente o gás, além de essa radiação também interagir com o cátodo por meio do efeito fotoelétrico, produzindo mais elétrons livres. Esse processo é chamado de avalanche. Os elétrons livres ejetados dessas interações são coletados e contados por meio de pulsos elétricos. Os átomos ionizados se tornam íons positivos que também são acelerados devido à tensão aplicada, mas se movem muito mais lentamente que os elétrons livres, permanecendo quase sem movimento durante o processo, o que permite que os elétrons sejam contados antes que a concentração dos íons se torne alta suficiente para reduzir a magnitude do campo elétrico em torno do ânodo, cessando, assim, essa multiplicação do gás. O processo de formação das avalanches é esquematizado na figura abaixo. [11]

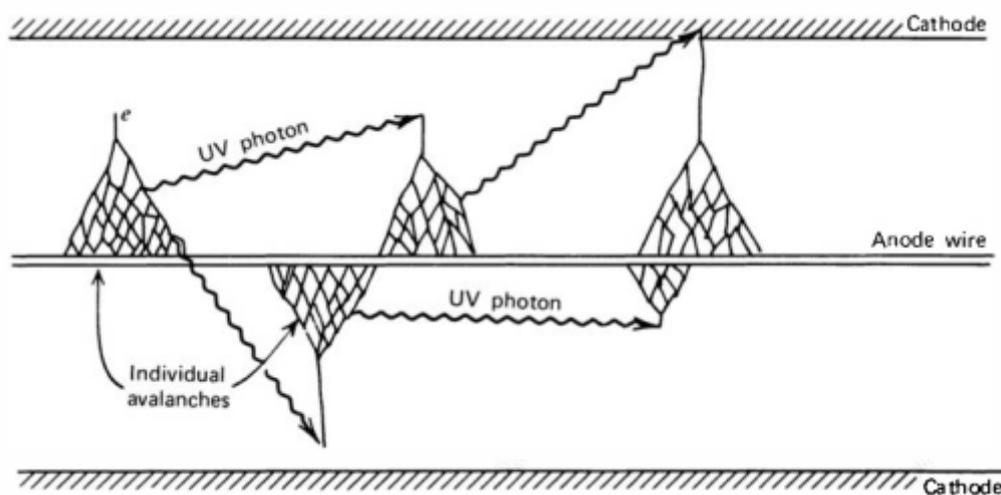


Figura 2: Mecanismo de avalanche em detectores do tipo Geiger-Müller. [11]

3.2 METODOLOGIA DOS TRABALHOS DE REFERÊNCIA

Em um levantamento e mapeamento radiométrico realizado em um Serviço de Medicina Nuclear no Norte do Paraná, chamado de Clínica A, foram feitas medidas de taxa de dose em 29 pontos do Serviço em dias e horários aleatórios durante três meses com um detector Geiger-Müller. Os pontos foram espaçados em 1,2 m um do outro, havendo mais de um ponto por dependência, e as medidas foram realizadas a 1,7 m do chão. Dos 29 pontos, 6 deles foram postos na sala de exames e outros 6 na sala de espera; 4 estavam no laboratório de manipulação; 2 foram colocados na sala onde ficam os técnicos e 2 na sala de cardiologia e ergometria; o restante foi distribuído nas áreas de circulação e sala de administração. Não foi mencionado o tempo de cada medida. [12]

Houve outros três levantamentos no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de Botucatu:

- [13] mediu taxas de dose em 41 pontos do Serviço durante seis meses com um detector Geiger-Müller em dias e horários diferentes da semana, usando o critério de definir pontos onde havia uma ocupação significativa de IOEs e para representar a extensão da dependência a fim de melhor estimar a distribuição espacial. Não foi especificado a que altura do chão cada ponto foi medido. Na sala quente, foram definidos sete pontos de medição: o centro, frente ao gerador, frente ao gerador na altura dos olhos, frente ao lixo de ^{131}I , frente ao lixo de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, frente ao recipiente para rejeito contendo perfuro-cortantes na altura dos olhos, e frente ao depósito de rejeitos. Foram determinados entre 2-4 pontos para cada sala de exames e 3 pontos na sala de pacientes injetados; no restante dos ambientes, foram postos 1 ou 2 pontos. Não foi especificado em qual altura o restante das medidas foram feitas nem o tempo de cada medida. O trabalho concluiu que o mapa espacial construído indicou "pontos cuja ocupação deve ser minimizada" e que foi "um instrumento útil para a proteção radiológica aplicada à Medicina Nuclear e colabora com o princípio de otimização". Segundo a conclusão deste

trabalho, o mapa espacial orientou os IOEs em relação aos pontos onde a ocupação deveria ser reduzida.

- [14] mediu níveis radiométricos de 68 pontos junho e setembro de 2013 com um detector Geiger-Müller. Os pontos escolhidos para medição foram locais com maior fluxo de pacientes e permanência de IOEs, onde foi determinado um ponto em cada canto da dependência e outro ponto para cada quadrante, totalizando oito (sala quente, uma das salas de exames e sala de espera de pacientes injetados). Em salas com demais trabalhadores, foram colocados pontos em frente aos painéis de controle e computadores para simular a posição dessas pessoas. Pontos em outros ambientes foram escolhidos a fim de contemplar todo o espaço físico do Serviço. Desse modo, foram colocados entre 4-5 pontos em outras três salas de exames, 4 pontos na sala de coordenação, 3 pontos na sala de injeção e 2 pontos na sala de captação. Nas demais salas, foram distribuídos entre 1-2 pontos. As medidas foram feitas na altura do tórax, exceto o ponto onde fica o gerador de ^{99m}Tc , onde foi realizada na altura dos olhos, e tiveram uma duração média de 40 minutos. Foi concluído que o mapeamento espacial constituiu "rica informação para prevenção à exposição à radiação ionizante nas dependências do serviço de Medicina Nuclear na medida que apontam com elevada clareza as áreas de risco e sua intensidade"
- [15] fez leituras da taxa de dose em 50 pontos duas vezes ao dia (uma pela manhã e outra à tarde) entre o período de 11/03/2019 e 05/04/2019 utilizando também um detector Geiger-Müller. Foi determinado mais de um ponto (entre 3-4) de medida em áreas controladas, onde havia maior concentração de IOEs e fontes de radiação (salas de exames e laboratório de manipulação). Em salas onde havia um menor nível de ocupação de IOEs e presença de fontes, foi definido apenas um ponto. As medidas foram feitas na altura do tórax, a fim de simular a dose efetiva de corpo inteiro, e em quatro pontos do Laboratório de Manipulação, foi medida a taxa de dose na altura dos olhos, para verificar a dose recebida no cristalino. O tempo de medição de cada ponto também não foi explicitado. O mapa espacial deste trabalho foi "de suma importância" para avaliação das doses a que os IOE estão submetidos,

permitindo a identificação de áreas que acarretam em maiores níveis de radiação e conseqüentemente a adoção de medidas de radioproteção para redução das taxas de exposições".

4. LEVANTAMENTO E MAPEAMENTO RADIOMÉTRICO NO HCPA

Foram determinados 47 pontos no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre, seguindo os critérios de representar a permanência e trânsito de IOEs no Serviço e de contemplar todo o ambiente com a finalidade de construir o mapa espacial. Para cada sala de exames, exceto a sala com a Tomografia Computadorizada por Emissão de Pósitrons (PET-CT), onde foram definidos 2 pontos, e a sala de cardiologia e ergometria foram selecionados 4 pontos; para o laboratório de manipulação, foram definidos 3 pontos; para as salas de injeção e técnicos, 2 pontos; para as dependências restantes, foi selecionado 1 ponto. Na figura 3 abaixo, todos os pontos estão representados com a cor azul e as fontes, sendo de origem paciente ou não, estão com a cor laranja.

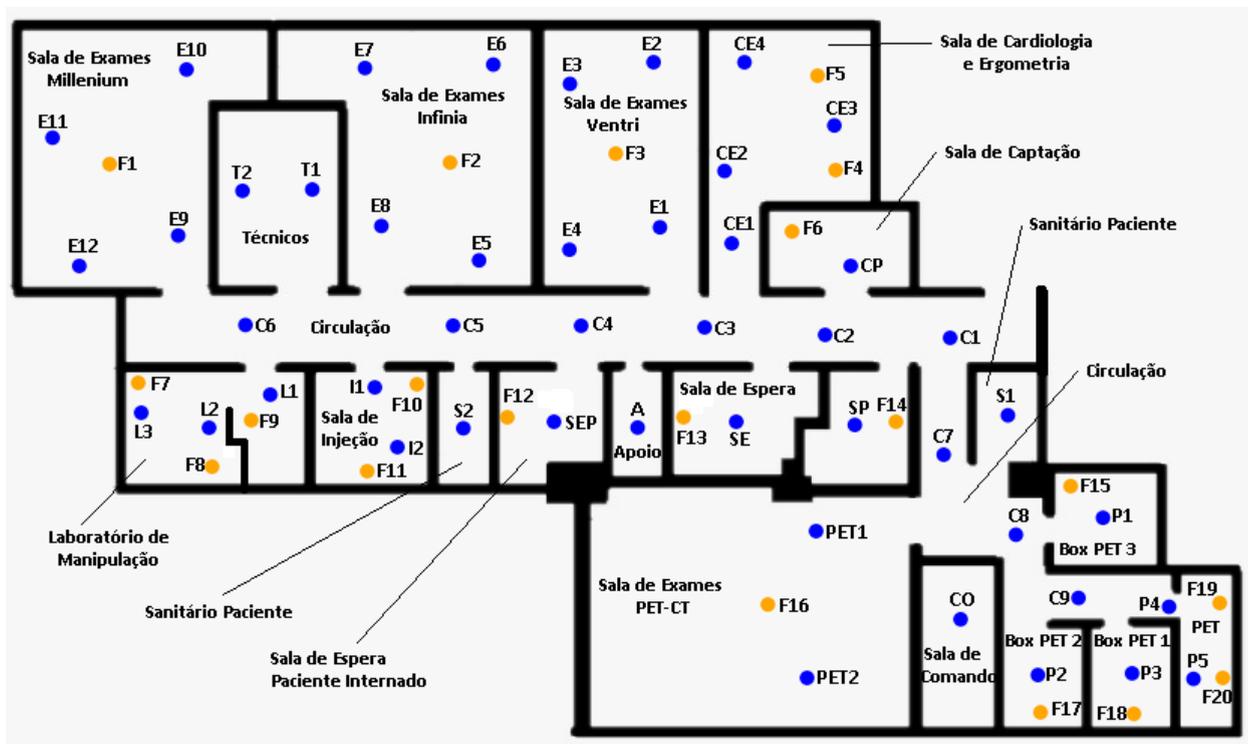


Figura 3: Esquema dos pontos selecionados para medição das taxas de dose (azuis) e pontos onde havia fontes, de origem paciente ou não (laranja).

Foram feitas medidas da taxa de dose de cada ponto nos dias 19/10/21 e 20/10/21 com a presença de pacientes utilizando um contador Geiger RadEye B20 da ThermoFisher, o qual é calibrado para estimar a grandeza equivalente de dose ambiente com profundidade de 10 mm. As medidas foram realizadas na altura do tórax do IOE que fez as leituras por 1 minuto no modo de aquisição *scaler* do equipamento, o qual integra os valores medidos durante o tempo pré-estabelecido e, então, o valor dessa integração é dividido por esse tempo. Isso faz com que a medida se torne mais precisa. Os valores medidos em cada ponto estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 5: Medidas da taxa de dose em cada ponto selecionado com a presença de pacientes.

PONTO	LOCAL	TAXA DE DOSE ($\mu\text{Sv/h}$)
C1	Circulação	$0,51 \pm 0,05$
C2	Circulação	$0,31 \pm 0,05$
C3	Circulação	$0,47 \pm 0,05$
C4	Circulação	$0,15 \pm 0,05$
C5	Circulação	$0,15 \pm 0,05$
C6	Circulação	$0,50 \pm 0,05$
C7	Circulação	$0,18 \pm 0,05$
C8	Circulação	$0,45 \pm 0,05$
C9	Circulação	$2,18 \pm 0,05$
CP	Sala de Captação	$0,25 \pm 0,05$
CE1	Sala de Cardiologia e Ergometria	$0,31 \pm 0,05$
CE2	Sala de Cardiologia e Ergometria	$2,75 \pm 0,05$
CE3	Sala de Cardiologia e Ergometria	$7,29 \pm 0,05$
CE4	Sala de Cardiologia e Ergometria	$1,03 \pm 0,05$
E1	Sala de Exames	$2,01 \pm 0,05$
E2	Sala de Exames	$2,12 \pm 0,05$
E3	Sala de Exames	$10,6 \pm 0,05$
E4	Sala de Exames	$1,29 \pm 0,05$
E5	Sala de Exames Gama - Câmara 2	$1,27 \pm 0,05$
E6	Sala de Exames Gama - Câmara 2	$3,03 \pm 0,05$
E7	Sala de Exames Gama - Câmara 2	$2,00 \pm 0,05$
E8	Sala de Exames Gama - Câmara 2	$1,75 \pm 0,05$

E9	Sala de Exames Gama - Câmara 1	1,45 ± 0,05
E10	Sala de Exames Gama - Câmara 1	4,28 ± 0,05
E11	Sala de Exames Gama - Câmara 1	19,00 ± 0,05
E12	Sala de Exames Gama - Câmara 1	2,24 ± 0,05
T1	Técnicos	0,21 ± 0,05
T2	Técnicos	0,69 ± 0,05
L1	Laboratório de Manipulação	2,49 ± 0,05
L2	Laboratório de Manipulação	4,84 ± 0,05
L3	Laboratório de Manipulação	1,15 ± 0,05
I1	Sala de Injeção	0,22 ± 0,05
I2	Sala de Injeção	8,20 ± 0,05
S2	Sanitário Paciente	0,11 ± 0,05
SEP	Sala de Espera Paciente Internado	7,10 ± 0,05
A	Apoio	1,05 ± 0,05
SE	Sala de Espera	10,70 ± 0,05
SP	Sala de Preparo	0,23 ± 0,05
S1	Sanitário Paciente	6,06 ± 0,05
PET1	Sala de Exames PET-CT	4,40 ± 0,05
PET2	Sala de Exames PET-CT	3,02 ± 0,05
CO	Sala de Comando	0,79 ± 0,05
P1	BOX PET 3	15,90 ± 0,05
P2	BOX PET 1	25,00 ± 0,05
P3	BOX PET 2	0,66 ± 0,05
P4	PET	1,44 ± 0,05
P5	PET	3,10 ± 0,05

Como foi feita apenas uma medida em cada ponto, não foi possível calcular médias nem desvio padrão. A incerteza mencionada é a metade da menor leitura do equipamento.

A partir desses dados, foi construído um mapa de calor com a função de interpolação radial *Rbf* do pacote *scipy* incluído na linguagem de programação *Python*. Os parâmetros usados foram os padrões, como a função multiquadrática dada por

$$\sqrt{\left(\frac{r}{\varepsilon}\right)^2 + 1} \quad (8)$$

em que r é a distância euclidiana entre dois pontos que a própria função calcula e ε é uma constante de ajuste. O valor da constante que melhor ajustou a função para os dados coletados foi 2. [15]

Para a construção do mapa, também foi estimada a taxa de dose emitida pela fonte, considerando-as pontuais. Apesar de essa aproximação ser exagerada, principalmente para fontes de origem paciente, o que interessa para o trabalho é a estimativa da taxa de dose no contorno da fonte, já que é um lugar que o IOE pode estar. Além disso, a função de interpolação usada calcula os valores da taxa de dose em regiões onde não houve a coleta desse dado a partir dos valores obtidos nos pontos de medição. Isso faz com que o mapa mostre taxas de dose menores no contorno de fontes do que as taxas de pontos ao redor delas, o que não faz sentido fisicamente. Essa estimativa foi feita ao incrementar o valor da taxa de dose do ponto de medição mais próximo por um fator proporcional ao quadrado da distância da fonte a esse ponto. Os valores obtidos se encontram na tabela 6. O mapa espacial com as taxas de dose medidas e estimadas está na figura 4.

Tabela 6: Estimativas das taxas de dose emitidas pelas fontes, de origem paciente ou não, que havia no Serviço no momento das medidas.

PONTO	TAXA DE DOSE ($\mu\text{Sv/h}$)	PONTO	TAXA DE DOSE ($\mu\text{Sv/h}$)
F1	61,75	F11	19,02
F2	7,40	F12	17,32
F3	8,13	F13	31,67
F4	16,05	F14	0,37
F5	3,60	F15	31,9
F6	3,40	F16	36,88
F7	1,43	F17	58,00
F8	6,58	F18	1,53
F9	3,11	F19	3,87

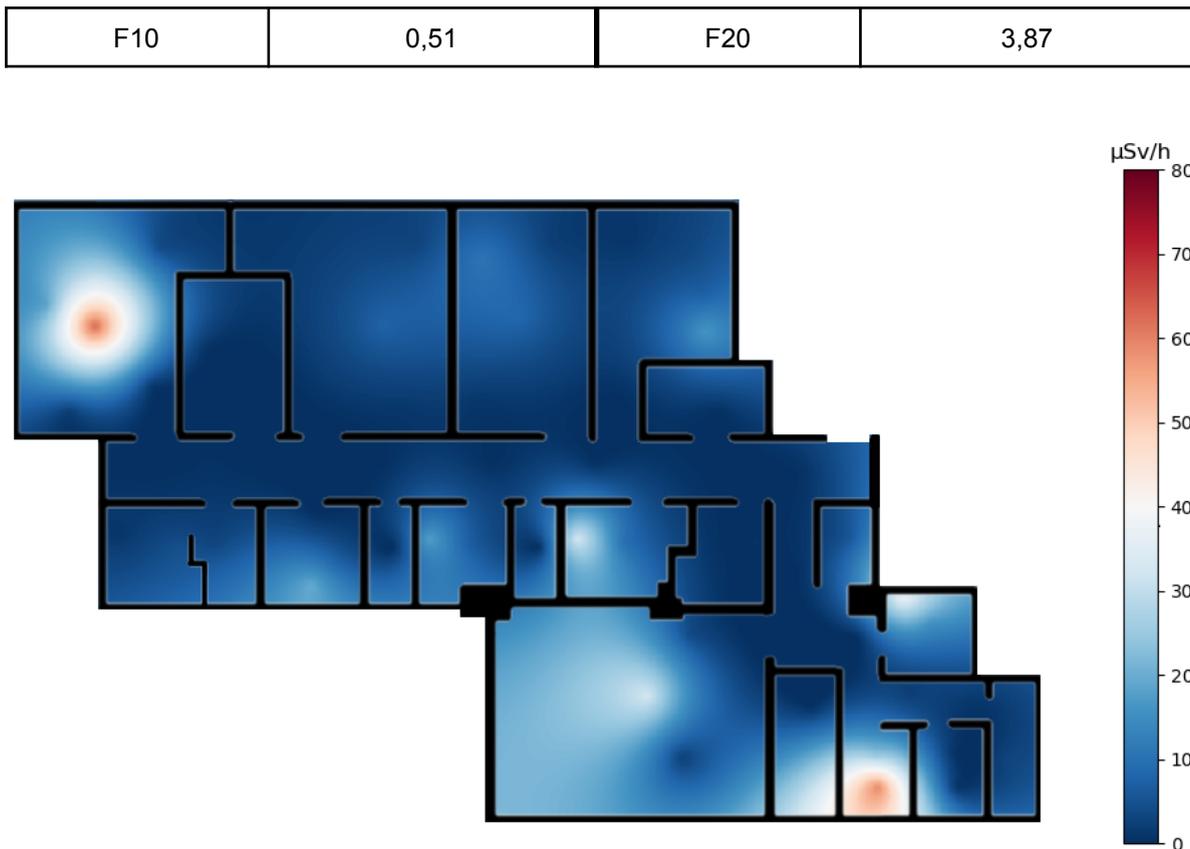


Figura 4: Mapa de calor das taxas de dose medidas nos pontos selecionados e com as estimativas da taxa de dose nos pontos onde as fontes estão, considerando a presença de pacientes.

Levando em consideração os níveis de investigação estabelecidos pela CNEN - 6 mSv por ano ou 1 mSv por mês em dose efetiva -, foi calculada a carga horária máxima mensal e anual que um IOE pode estar em cada ponto de medição até atingir esse nível. Foram utilizados os níveis de investigação porque estes são os níveis com os valores de dose mais restritivos e, como o próprio nome já diz, demandam investigação dos possíveis eventos ocorridos para que o IOE o atingisse.

Segundo o Plano de Proteção Radiológica do Serviço de Medicina Nuclear do HCPA, a carga horária máxima de um IOE é 8h diárias. Considerando uma semana com 5 dias úteis, são 40h semanais. Supondo que há 4 semanas em um mês e 48 semanas de trabalho em um ano, as cargas horárias máximas mensais e anuais que um IOE pode passar no Serviço é de 160h e 1920h, respectivamente. Ao fazer a estimativa do tempo máximo que um IOE pode permanecer nos pontos

selecionados, percebeu-se que haviam pontos que, por terem uma taxa de dose baixa, permitiam um tempo maior que as cargas horárias máximas acima. Para esses pontos, foi atribuído o tempo máximo igual às cargas horárias máximas mencionadas.

Tabela 7: Cargas horárias máximas para assegurar que as doses mensais e anuais não ultrapassarão os níveis de investigação mensal e anual estabelecidos pela CNEN (1 mSv e 6 mSv, respectivamente)

PONTO	DOSE PARA PERMANÊNCIA DE 160h (mSv)	CARGA HORÁRIA MENSAL (h)	CARGA HORÁRIA ANUAL (h)
C1	0.0816	160	1920
C2	0.0496	160	1920
C3	0.0752	160	1920
C4	0.0240	160	1920
C5	0.0240	160	1920
C6	0.0800	160	1920
C7	0.0288	160	1920
C8	0.0720	160	1920
C9	0.3488	160	1920
CP	0.0400	160	1920
CE1	0.0496	160	1920
CE2	0.4400	160	1920
CE3	1.1664	137	823
CE4	0.1648	160	1920
E1	0.3216	160	1920
E2	0.3392	160	1920
E3	1.6960	94	566
E4	0.2064	160	1920
E5	0.2032	160	1920
E6	0.4848	160	1920
E7	0.3200	160	1920
E8	0.2800	160	1920
E9	0.2320	160	1920
E10	0.6848	160	1920
E11	3.0400	52	315

E12	0.3584	160	1920
T1	0.0336	160	1920
T2	0.1104	160	1920
L1	0.3984	160	1920
L2	0.7744	160	1920
L3	0.1840	160	1920
I1	0.0352	160	1920
I2	1.3120	121	731
S2	0.0176	160	1920
SEP	1.1360	140	845
A	0.1680	160	1920
SE	1.7120	93	560
SP	0.0368	160	1920
S1	0.9696	160	990
PET1	0.7040	160	1920
PET2	0.4832	160	1920
CO	0.1264	160	1920
P1	2.5440	62	377
P2	4.000	40	240
P3	0.1056	160	1920
P4	0.2304	160	1920
P5	0.4960	160	1920

4.1 DISCUSSÃO

Pela figura 4, é possível notar que as maiores taxas de dose medidas estão nas salas de exames Millenium e Ventri, na sala de espera para pacientes internados com a presença de um paciente no lado esquerdo da sala e nas salas de box PET 2 e 3. Essas taxas de dose altas são esperadas devido à presença de pacientes nesses locais. Uma possível melhoria seria adicionar as atenuações das paredes, já que, pelo mapa, parece que a taxa de dose provinda do box PET 2 adentra a sala de comando, o que é improvável de ocorrer na realidade.

Pela tabela 7, pode-se perceber que há 8 pontos (CE3, E3, E11, I2, SEP, SE, P1 e P2) onde o IOE deveria passar menos tempo que a carga horária máxima para

não atingir os níveis de investigação. O que também é esperado, já que nesses locais havia pacientes injetados. Além disso, é necessário ressaltar que a blindagem de ambientes como o laboratório de manipulação, a sala de técnicos e a sala de comando é muito eficiente, já que as cargas horárias correspondentes aos pontos selecionados nesses locais equivalem às cargas horárias máximas de trabalho.

5. GUIA PARA A REALIZAÇÃO DE LEVANTAMENTOS RADIOMÉTRICOS

- **Seleção de pontos:**

Assim como a Norma 3.02 recomenda, todos os trabalhos selecionaram pontos que representassem o trânsito e permanência de IOEs. Desse modo, recomenda-se determinar pelo menos 4 pontos em cada sala de exames e no laboratório de manipulação/sala quente, distribuindo-os de forma a contemplar todo o espaço. Apesar de a sala de espera para pacientes injetados não ser um local com um alto fluxo de IOEs, também é recomendado definir pelo menos 3 pontos nesse ambiente, já que esses pacientes também emitem radiação ionizante. Em salas de captação, injeção, de técnicos e de cardiologia e ergometria, sugere-se definir de 1 a 2 pontos, preferencialmente o mais próximo possível de onde o(s) IOE(s) está(ão) exercendo sua função e se for constatado que a posição do paciente está em uma altura paralela à região das gônadas, recomenda-se medir a taxa de dose nessa altura também. No restante dos ambientes, pode-se definir apenas 1 ponto no centro das salas.

- **Dias e horários:**

Considerando que pacientes também emitem radiação ionizante, é recomendado fazer leituras em dias com e sem a presença de pacientes, de modo que esses levantamentos sejam analisados separadamente a fim de estimar as taxas de dose em ambas as situações. Também sugere-se realizar as medidas em dias e horários diferentes, para que o levantamento consiga refletir o mais próximo possível da rotina do Serviço. Entretanto, devido ao tempo que se leva para realizar um levantamento com mais pontos de medição além dos locais que são abrigo de fontes, não é possível fazer essa

monitoração frequentemente. Assim, sugere-se fazer esse processo quando houver alguma alteração na rotina do Serviço ou na disposição de fontes ou blindagens.

- **Posicionamento do detector:**

Sugere-se realizar as medidas na altura do tórax, considerando que a esfera ICRU, que simula o tórax humano, é a referência para as grandezas operacionais que relacionam a dose efetiva de corpo inteiro com a irradiação externa. No laboratório de manipulação/sala quente é recomendado medir a taxa de dose também na altura dos olhos e na altura da região das gônadas, especialmente em frente aos emissores de radiação ionizante.

- **Tempo da medida:**

É recomendado que a medida seja realizada por um tempo mínimo de 1 minuto ou o tempo necessário para que o detector não apresente uma variação grande no valor mostrado.

- **Análise dos dados:**

Sugere-se construir um mapa de calor espacial do Serviço para o levantamento realizado e fixá-lo em um local de fácil acesso para os IOEs a fim de melhor visualizar a dose que um IOE pode vir a receber. Se forem feitos levantamentos com e sem a presença de pacientes, recomenda-se construir um mapa para cada situação a fim de melhor avaliar as taxas de dose ambiente para ambas as situações. Vale ressaltar que o mapa não precisa ser necessariamente construído a partir da linguagem *Python* usada no capítulo 4. Nos trabalhos usados como referência, foram utilizadas diversas ferramentas, como o software *MatLab*. Também é útil estimar a carga horária máxima que um IOE pode permanecer ou transitar pelos pontos selecionados para que não atinja os níveis de investigação estabelecidos pela CNEN.

6. CONCLUSÃO

Apesar de ter sido feita apenas uma medição no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre, o mapa de calor espacial construído pôde revelar rica informação sobre a dose que pode ser recebida se o IOE ficar em certos pontos durante a realização de exames. Espera-se que ele se torne uma ferramenta muito útil para que a proteção radiológica dos IOEs do Serviço e seja otimizada. Além disso, espera-se que o guia descrito neste trabalho possa ser adaptado a qualquer Serviço de Medicina Nuclear e que auxilie os IOEs a realizarem levantamentos radiométricos da forma mais eficiente possível.

7. REFERÊNCIAS

- [1] KEEVIL, S. F. **Physics and Medicine: a historical perspective**. Disponível em < [https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(11\)60282-1.pdf](https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(11)60282-1.pdf) >
- [2] BAILEY, D. L.; HUMM, J. L.; TODD-POKROPEK, A.; ASWEGEN, A. van. **Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students**. Viena: IAEA, 2014.
- [3] TAUHATA, L.; SALATI, I.; PRINZIO, R. D.; PRINZIO, A. R. D. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2013.
- [4] GHIZDOVĂT, V.; GHINET, M.; GHINET, S.; GRIEROSU, I.; STEFĂNESCU, C. **A Retrospective Study of the Dosimetry – Radioprotection Relationship in a Nuclear Medicine Diagnosis Laboratory**. 2015.
- [5] XAVIER, A. M.; GAIDANO, E.; MORO, J. T.; HEILBRON, P. F. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. [S.I.]: UFRGS/CNEN, 2014.
- [6] Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica - Norma CNEN-NN-3.01. 2014**. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>.
- [7] Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica - Posição Regulatória 3.01/002**. Disponível em < http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_02.pdf >.
- [8] Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Restrição de Dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas - Posição Regulatória 3.01/004:2011**. Disponível em < http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_04.pdf >.

[9] Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Serviços de Radioproteção - Norma CNEN-NN-3.02.** 2018. Disponível em <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm302.pdf>>.

[10] Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Medicina Nuclear - Norma CNEN-NN-3.05.** 2013. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm305.pdf>>.

[11] KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement - 4th edition.** [S.l.]: Wiley, 2010.

[12] LOPES, P. H. S.; BARROS, F. S. **Mapa espacial de dose em serviço de medicina nuclear.** Anais do Simpósio em Engenharia Biomédica VIII, 2015.

[13] OLIVEIRA, C. V.; MENDONÇA, C.; SILVA, E. T.; MORIGUCHI, S. M.; KOGA, K. H. **Mapa Espacial de Dose do Serviço de Medicina Nuclear do Hospital das Clínicas de Botucatu.** Revista Brasileira de Física Médica, 2013.

[14] PINHEIRO, R. M. **Mapeamento do Nível Radiométrico e Construção de Mapa Espacial em Serviço de Medicina Nuclear.** 2013.

[15] BÉRGAMO, P. L.; CAMARGO, L. F.; MODA, K. A.; BIASOTTI, G. G. A.; MORIGUCHI, S. M.; KOGA, K. H.; ZANDONÁ, E. A. **Estudo Preliminar e Mapeamento dos Níveis de Taxa de Exposição do Serviço de Medicina Nuclear do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de Botucatu – UNESP.** 2019.

[16] The SciPy community. **scipy.interpolate.Rbf.** Disponível em <<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.Rbf.html>>.