



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde

**Elaboração de um sistema de proteção física para fontes radioativas  
utilizadas nas práticas clínicas de radioterapia**

**SAMIRA JUNGES**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre Profissional em Tecnologia das  
Radiações em Ciências da Saúde na Área  
de Concentração Processos de Radiação  
na Saúde**

**Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni**

**São Paulo  
2022**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde

**Elaboração de um sistema de proteção física para fontes radioativas  
utilizadas nas práticas clínicas de radioterapia**

**Versão corrigida**

**SAMIRA JUNGES**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre Profissional em Tecnologia das  
Radiações em Ciências da Saúde na Área  
de Concentração Processos de Radiação  
na Saúde**

**Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Alberto Zeituni**

**São Paulo  
2022**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

JUNGES, S. ***Elaboração de um sistema de proteção física para fontes radioativas utilizadas nas práticas clínicas de radioterapia***. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Junges, Samira

Elaboração de um sistema de proteção física para fontes radioativas utilizadas nas práticas clínicas de radioterapia / Samira Junges; orientador Carlos A. Zeituni. -- São Paulo, 2022.

85 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde (Processos de Radiação na Saúde) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. Segurança Física. 2. Proteção Física. 3. Braquiterapia. 4. Fontes Radioativas. I. Zeituni, Carlos A., orient. II. Título.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a minha família, Maria José Alves dos Reis e Salize Junges pelo suporte e pela alegria que me dão nesta vida. Agradeço, em memória, a meu pai por me incentivar educacionalmente e ao esforço que ele e minha mãe tiveram para prover meios para isso. Agradeço novamente a minha mãe por ser minha maior motivadora a encarar novos desafios, em todos os âmbitos da minha vida, mesmo quando necessitava muita coragem para encará-los.

Agradeço a todos os amigos que estiveram ao meu lado mesmo quando não foi possível estar tão presente e por toda a compreensão nos momentos mais delicados. A minha mais fiel escudeira, Gisele Ramires Machado, por estar todos os dias presente na minha vida, e seu apoio incondicional a tudo que me proponho a fazer. Aos amigos, gaúchos paulistas, Larisse Bonatto, Priscilla Collin e Cristiano Duarte, minha família longe da minha cidade natal.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Carlos Alberto Zeituni por compartilhar suas experiências e conhecimento para que este trabalho fosse realizado. Ao IPEN e sua equipe, sempre dispostos a sanar as dúvidas e auxiliar em todos os momentos. Aos colegas da turma II do mestrado profissional pela união e incentivo durante tantos desafios.

A equipe da Clínica de Radioncologia de São Paulo, por me acolher e impulsionar a novas conquistas, as quais foram possíveis graças ao apoio das colegas e amigas Aline B. Guarnieri e Jessica Lodovichi.

Aos colegas do grupo RTCON pelo suporte na realização deste trabalho, por agregarem e compartilharem suas experiências. Agradeço em especial ao físico Lucas A. Radicchi por me desafiar, incentivar e agregar seus conhecimentos ao trabalho proposto.

A todos os funcionários da Casa de Saúde Hospital Santa Marcelina, em especial a equipe da Radioterapia que de alguma maneira auxiliaram para que esta pesquisa fosse realizada.

## Epígrafe

“O primeiro princípio é que você não deve enganar a si mesmo, mas você é a pessoa mais fácil de se enganar.”  
(Richard F. Feynman)

## Resumo

JUNGES, S. *Elaboração de um sistema de proteção física para fontes radioativas utilizadas nas práticas clínicas de radioterapia*. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

**Introdução:** A utilização de materiais radioativos na prática clínica é empregada para tratamento ou melhoria da qualidade de vida de pacientes com doenças como o câncer, desde a descoberta da radioatividade. A remoção mal-intencionada e não autorizada destas fontes pode levar a consequências catastróficas e irremediáveis. Pensando na segurança destes materiais radioativos, a norma Comissão Nacional de Energia Nuclear 2.06 foi proposta em 2019, com prazo de adequação para as instalações brasileiras em relação aos requisitos de segurança física por ela definidos. **Objetivo:** Propor um modelo para a elaboração de sistema de proteção física para fontes de radiação, especialmente as utilizadas na técnica de braquiterapia, que contribua para melhoria da segurança de fontes e na adequação às normas vigentes dos serviços de radioterapia brasileiros. **Materiais e Métodos:** Um projeto conceitual de um Sistema de Proteção Física para fontes radioativas utilizadas em radioterapia foi elaborado utilizando a metodologia DEPO (Perfil do Processo de Projeto e Avaliação), considerando também as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e as exigências da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em especial a normativa nuclear 2.06. **Resultados:** As sequências de eventos considerando diferentes caminhos até a fonte foram traçados e a partir deles os pontos críticos de detecção (PCD) foram determinados. As probabilidades de interrupção do sistema foram calculadas e avaliadas e então a eficácia do sistema pode ser estimada, apresentando valores entre 91% 99% considerando otimizações na estrutura do projeto de Proteção Física. **Conclusões:** Utilizando a metodologia proposta foi possível estruturar o projeto de um sistema de proteção física, delineando as áreas que segurança, os elementos de proteção física e os fluxos de adversários possíveis. Frente às ameaças postuladas, os objetivos de eficácia do SisPF para o projeto conceitual foram atingidos, após adequações do projeto. Medidas personalizadas dos elementos de proteção (detecção, retardo e resposta) para cada SisPF são necessárias para corroborar a robustez de um projeto de proteção física bem como o conhecimento real acerca das ameaças brasileiras às fontes radioativas.

Palavras-chave: Segurança Física, Sistemas de Proteção Física, Braquiterapia

## Abstract

JUNGES, S. *Elaboração de um sistema de proteção física para fontes radioativas utilizadas nas práticas clínicas de radioterapia*. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia das Radiações em Ciências da Saúde) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

**Introduction:** The use of radioactive materials in clinical practice aims to perform treatments or improve the quality of life of patients with diseases such as cancer, since the discovery of radioactivity. Malicious and unauthorized removal of these sources can lead to catastrophic and irremediable consequences. Taking into account the security of these radioactive materials, in 2019, the National Nuclear Energy Commission (CNEN) proposed the regulatory paper 2.06, Physical Protection of Radioactive Sources and Associated Facilities where the Brazilian facilities should meet the defined physical security requirements. **Objective:** To propose a model for the development of a physical protection system for radiation sources, especially those used in the brachytherapy technique, which contributes to improving the security of sources and adapting them to the current standards of Brazilian radiotherapy facilities. **Materials and Methods:** A conceptual design of a Physical Protection System for radioactive sources used in radiotherapy was elaborated using the DEPO methodology (Design and Evaluation Process Outline), also considering the recommendations of the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the requirements of the CNEN, in special the regulation 2.06. **Results:** The sequences of events considering different paths to the source were traced and from them, the critical detection points (CDP) were determined. The interruption probabilities were calculated and evaluated, and then the system effectiveness could be estimated, showing values between 91% and 99% considering optimizations in the structure of the Physical Protection project. **Conclusions:** Using the proposed methodology, it was possible to structure the design of a physical protection system, outlining the areas that provide security, the elements of physical protection, and possible adversary flows. Faced with the postulated threats, the SisPF effectiveness objectives for the conceptual project were achieved, after adjustments to the Project. Personalized measures of the protection elements (detection, delay, and response) for each SisPF are necessary to corroborate the robustness of a physical protection project as well as the real knowledge about the Brazilian threats to radioactive sources.

*Keywords: Security, Physical Protection Systems, Brachytherapy,*

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ABP** – Ameaça Base de Projeto
- CNEN** - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- DEPO** – Perfil do processo de projeto e avaliação
- DSI** - Diagrama da Sequência de Intrusão
- EPF** – Equipe de Proteção Física
- HDR** – Braquiterapia de alta taxa de dose
- IAEA** - Agência Internacional de Energia Atômica
- IOE** – Indivíduo ocupacionalmente exposto
- IPEN** - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
- OMS** – Organização Mundial de Saúde
- NSSEP** - Nuclear Security Science and Safeguards Education Portal
- PCD** – Ponto crítico de detecção
- PPF** – Plano de Proteção Física
- PR** – Proteção Radiológica
- SNL** - Sandia National Laboratories
- SPR** – Supervisor de Proteção Radiológica
- SisPF** – Sistema de Proteção Física

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Dimensões de fonte utilizada em braquiterapia de alta taxa de dose.....	16
Figura 2 Unidade de tratamento de braquiterapia. ....	17
Figura 3 Balde blindado contendo fonte exaurida retirada de operação.....	17
Figura 4 Estrutura de gestão hierárquica para a proteção física de fontes radioativas. ...	20
Figura 5 Definição do perfil do processo de projeto e avaliação de um SisPF (Design and Evaluation Process Outline, DEPO) .....	22
Figura 6 Representação das camadas de proteção crescente das áreas de segurança .	23
Figura 7 Elementos do sistema de proteção física .....	26
Figura 8 Diagrama exemplificando o papel dos mecanismos de retardo após a detecção em $T_0$ .....	28
Figura 9 Diagrama destacando o momento da detecção oportuna a fim de medir a eficácia do sistema de segurança.....	30
Figura 10 Diagrama de situação da instalação com principais pontos de acesso externos .....	36
Figura 11 Dimensões de fonte de Irídio 192 Nucletron, modelo mHDR v2 .....	37
Figura 12 Dimensões do equipamento de braquiterapia remoto Microselectron V2.....	37
Figura 13 Equipamento de braquiterapia remoto (1) e sistema de manivelas para retração manual do cabo da fonte (2) e check-cable (3). ....	38
Figura 14 Layout típico de uma sala de braquiterapia HDR .....	40
Figura 15 Balde de transporte contendo cápsula de fonte radioativa exaurida. ....	40
<i>Figura 16 Cápsula contendo fonte radioativa exaurida.....</i>	<i>41</i>
Figura 17 Planta baixa da instalação com indicação das áreas .....	46
Figura 18 Indicação dos diferentes acessos à fonte radioativa .....	51
Figura 19 Organograma da equipe de proteção física.....	52
Figura 20 A Localização dos mecanismos de detecção, dissuasão e retardo presentes na instalação .....	58
Figura 21 Camadas de segurança de um sistema de proteção física .....	63
Figura 22 Análise de Árvore de Falhas: ramo com “topo arredondado e base achatada” = “E”, a saída ocorre se todas as entradas ocorrerem simultaneamente; ramo em "topo triangular e base curvada" =“OU”, a saída ocorre se uma ou mais entradas ocorrerem ..	64
Figura 23 Sequência do adversário até a fonte radioativa ameaça 1: caminho em laranja e caminho em azul.....	65
Figura 24 Sequência do adversário até a fonte radioativa ameaça 2: caminho em verde e caminho em azul.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Funções e objetivos da proteção física.....	24
Tabela 2 Atividades aproximadas da fonte de Ir-192 durante sua permanência na instalação. ....	41
Tabela 3 Ameaça base de projeto (ABP) para a instalação radiativa analisada .....	43
Tabela 4 Áreas física da instalação e suas classificações .....	47
Tabela 5 Distância percorrida da entrada do hospital até alvos de roubo .....	51
Tabela 6 Estimativa das probabilidades de detecção dos elementos do SisPF .....	55
Tabela 7 Estimativa dos tempos de retardo dos elementos do SisPF .....	57
Tabela 8 Estimativa do desempenho das forças de resposta .....	61
Tabela 9 Determinação do PCD para caminho laranja, ameaça 1 .....	67
Tabela 10 Determinação do PCD para, ameaça 1, caminho azul .....	69
Tabela 11 Determinação do PCD para caminho azul, ameaça 2 .....	70
Tabela 12 Determinação do PCD para caminho verde, ameaça 2.....	71
Tabela 13 Determinação do PCD para caminho laranja, ameaça 1, roubo de fonte contida no balde.....	72
Tabela 14 Determinação do PCD para caminho azul, ameaça 1, roubo de fonte contida no balde.....	73
Tabela 15 Determinação do PCD para caminho azul, ameaça 2, roubo de fonte contida no balde.....	74
Tabela 16 Determinação do PCD para caminho verde, ameaça 2, roubo de fonte contida no balde.....	75
Tabela 17 Determinação da localização dos PCD e resultados de $P_1$ .....	75
Tabela 18 Determinação das probabilidades de neutralização ( $P_N$ ) e cálculo da probabilidade global de eficácia do sistema .....	76

# Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1 Objetivo Geral .....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Utilização de radiação ionizante em tratamentos clínicos .....	15
3.2.1 Técnica de braquiterapia.....	15
3.3 Regulamentação para utilização de fontes radioativas nas práticas clínicas .....	18
3.3.1 Proteção radiológica e proteção física de fontes radioativas.....	18
3.4 Requisitos para um sistema de proteção física .....	21
3.4.1 Caracterização de instalações utilizando fontes radioativas .....	23
3.4.1 Ações de proteção física: dissuasão, detecção, retardo e resposta .....	26
4. METODOLOGIA.....	32
4.1 Objetivos do Sistema de Proteção Física (SisPF) .....	34
4.2 Descrição da instalação .....	35
4.3 Descrição do sistema de tratamento de braquiterapia .....	36
4.4 Definição dos alvos e estimativa de ameaças.....	42
4.4.1 Definição dos alvos: .....	42
4.4.2 Estimativa de ameaças: .....	42
4.5 Ameaça-base de projeto .....	43
5. PROJETO CONCEITUAL DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO FÍSICA (SisPF) .....	45
5.1 Áreas de segurança e projeto do sistema de proteção física .....	45
5.2 Descrição do sistema de vigilância e controle de acesso.....	48
5.3 Descrição dos acessos possíveis até a fonte radioativa .....	50
5.4 Descrição da equipe de proteção física (EPF) .....	52
5.4.1 Organograma da equipe de proteção física .....	52
5.4.2 Responsabilidades da equipe de PF e IOEs.....	53
5.4.3 Programa de treinamento e reciclagem periódica.....	53
5.4.4 Conscientização dos profissionais .....	54
5.5 Descrição dos elementos do sistema de proteção física.....	55
5.5.1 Dissuasão .....	55
5.5.2 Detecção.....	55

5.5.2.1 Estimativa das probabilidades de detecção .....	55
5.5.3 Retardo .....	56
5.5.3.1 Estimativa dos tempos de retardo dos elementos de proteção física .....	56
5.5.4 Resposta .....	57
5.5.4.1 Estimativa do desempenho das forças de resposta .....	60
5.7 Segurança da Informação .....	62
5.8 Análise das vulnerabilidades do SisPF .....	62
6. RESULTADOS .....	65
6.1 Análise da probabilidade de interrupção $P_1$ .....	66
6.2 Análise da probabilidade de neutralização e análise da eficácia do SisPF .....	76
7. CONCLUSÕES.....	78
7.1 Propostas para trabalhos futuros .....	80
8. REFERÊNCIAS .....	81

## 1. INTRODUÇÃO

A radioterapia é um método terapêutico que se desenvolveu desde a descoberta dos raios X e da radioatividade no final do século XIX e consiste no uso de fontes de radiação ou de feixes produzidos por aceleradores lineares para tratamento de doenças. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que até 70% dos casos de câncer receba indicação de radioterapia em alguma etapa de seu tratamento (INCA, 2020).

Entre as técnicas de radioterapia está a teleterapia, que utiliza fontes radioativas ou feixes de radiação produzidos por equipamentos, de modo a realizar tratamentos com radiação externa ao paciente, e a braquiterapia que normalmente utiliza fontes radioativas em contato muito próximo com a região a ser tratada.

O uso de radiação apresenta seus benefícios à saúde humana bem como apresenta riscos: se não manejadas de forma correta, as fontes radioativas podem causar danos ao meio ambiente e sérias consequências à vida humana. Dessa forma, logo no início do século XX, organizações visando a utilização segura da radiação começaram a se formar, dando início à proteção radiológica. A proteção radiológica reúne medidas técnicas e administrativas para reduzir a tão baixos quanto razoavelmente exequíveis a exposição dos seres humanos, visando protegê-los e ao e meio ambiente dos efeitos indesejáveis da radiação.

Para que nas práticas clínicas possamos utilizar fontes radioativas devemos considerar os requisitos de segurança necessários para que os tratamentos sejam alcançados da maneira mais efetiva e segura possível. Para isso, devem ser levados em consideração, desde o projeto estrutural da instalação até sua operação, os requisitos de segurança que preveem a proteção das pessoas e meio ambiente dessas fontes de radiação, definida como segurança radiológica, bem como a proteção destas fontes radioativas de ações indevidas, como atos de sabotagem e remoções não autorizadas, definida como segurança física.

A preocupação com a segurança física das fontes radioativas ganhou força mundialmente com o alarde à construção de possíveis *bombas-sujas* após os ataques às torres americanas de 11 de setembro de 2001 (MONTEIRO, 2020; VAZ, 2016) e embora a remoção não autorizada de materiais radioativos seja considerada um evento de baixa frequência, ela pode ter consequências catastróficas, especialmente quando realizado com intenções maléficas (MONTEIRO, 2020). Estima-se que entre 2015 e 2018, mais de 200 atos suspeitos envolvendo materiais radioativos tenham sido registrados ao redor do mundo (CASALLAS, 2021).

No Brasil, embora não tenham sido relatados eventos ou ameaças de ímpeto terrorista, acontecimentos envolvendo fontes radioativas como roubo de material (GLOBO, 2012; IPEN, 2015), ações próximas à áreas de usina nuclear (GLOBO, 2013) e a apreensão de suspeitos de apoio ao estado islâmico (EPOCA, 2018), mostram a necessidade em prover medidas para implementação, melhoria e atualização dos sistemas de proteção física das instalações radioativas brasileiras bem como o aumento de sua eficácia (TAVARES, 2018).

Pelo fato destes materiais potencialmente serem capazes de gerar danos irreparáveis aos indivíduos e até a estrutura ambiental de um país inteiro, organizações internacionais como a Agência Internacional de Energia Atômica têm publicado orientações para fortalecer a cultura e estabelecer os requisitos de segurança de fontes radioativas, utilizados para fins industriais, de pesquisa ou aplicadas à medicina (IAEA 2019, IAEA 2020). Estes requisitos de segurança devem ser implantados, preferencialmente, desde o início da construção da instalação, juntamente com a implementação de um programa de segurança radiológica (GARCIA, 2008).

Em 2019, baseada em recomendações da IAEA e em códigos de conduta relativos à segurança, a normativa nuclear 2.06, Proteção Física de Fontes Radioativas e Instalações Radiativas Associadas, foi publicada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) iniciando a regulamentação específica para serviços brasileiros que utilizam fontes de radiação. Atualmente no país existem cerca de 500 instalações que fazem a utilização de fontes radioativas seja em irradiadores de sangue, irradiadores industriais bem como na utilização de terapia com radiações (MONTEIRO, 2020). Todas as instalações devem elaborar um plano de proteção física para as fontes de radiação utilizadas nas suas práticas, adequando-se aos requisitos de segurança nela estabelecidos, de acordo com os diferentes níveis de proteção necessários para cada fonte, estabelecidos na norma em vigor (CNEN, 2019). Ainda com o objetivo de prevenir eventos não autorizados, o plano de proteção física deve considerar um sistema de proteção física (SisPF) com as funções de detectar, retardar e responder adequadamente a estes eventos, dissuadindo os adversários e prevenindo à concretização de atos maliciosos contra fontes e seu sistema de proteção. Nele também devem ser estabelecidos os procedimentos destinados à recuperação de materiais radioativos e mitigação de consequências de fontes que tenham saído de controle.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é propor um projeto para um sistema de proteção física para fontes de radiação enfatizando a proteção de fontes utilizadas nos serviços de radioterapia para a técnica de braquiterapia, de acordo com as recomendações internacionais *Nuclear Security Series* da Agência Internacional de Energia Atômica, e das exigências mínimas das normativas nacionais da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) vigentes, em especial a normativa nuclear 2.06 Proteção Física de Fontes Radioativas e Instalações Radiativas Associadas.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar as vulnerabilidades do sistema de proteção física proposto.
- Propor soluções que otimizem o SisPF a partir das vulnerabilidades encontradas de maneira a aperfeiçoar o sistema original.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Utilização de radiação ionizante em tratamentos clínicos**

O câncer está entre o grupo de doenças com causas multifatoriais de maior crescimento e mortalidade no mundo. No Brasil, com o aumento de expectativa de vida também se observa um aumento no número de casos de câncer, com estimativa de registro de 625 mil novos casos para cada ano do triênio de 2020-2022 (INCA, 2021), sendo considerado um problema de saúde pública no Brasil e no mundo (RT 2030, 2021). O tratamento do câncer, atualmente, leva em consideração fatores de múltiplas áreas, que incluem, entre outros, a cirurgia, quimioterapia e radioterapia. Neste âmbito, fatores socioeconômicos expressam as diferenças entre o acesso às diferentes modalidades de tratamento disponíveis (SILVA, 2019).

Entre os pacientes diagnosticados com câncer, a Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que até 70% dos casos receba indicação de radioterapia em alguma etapa de seu tratamento. A radioterapia consiste em um método de tratamento que utiliza radiação ionizante com finalidade de atingir as células tumorais causando alterações no material genético (DNA) e induzindo a célula à morte ou à perda da capacidade de se replicar. Para a realização desta técnica, diferentes feixes de radiação podem ser utilizados, como os raios X, raios gama, elétrons e prótons (RT2030, 2021).

De acordo com o tipo ou localização do tumor, podem ser utilizados dois tipos de radioterapia: a teleterapia, realizada de forma externa ao paciente; e a técnica de braquiterapia, onde a fonte emissora de radiação se encontra em contato ou muito próxima da região de tratamento. Com os avanços da tecnologia e por fins de segurança, a técnica de radioterapia externa utilizando fontes radioativas vem perdendo espaço para equipamentos geradores de radiação como aceleradores lineares. Na técnica de braquiterapia a utilização de fontes radioativas é ainda bastante difundida.

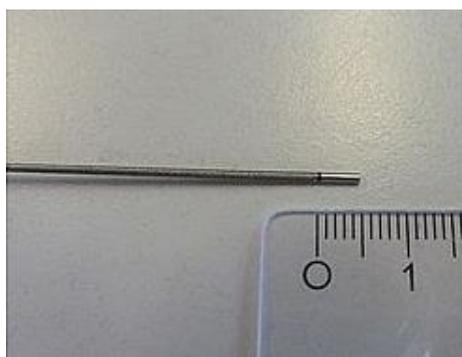
##### **3.2.1 Técnica de braquiterapia**

A braquiterapia é um método de tratamento que consiste na proximidade da fonte emissora de radiação com o alvo de tratamento (RT2030, 2021). Nesta técnica, as fontes radioativas são colocadas em contato, ou mesmo dentro da região a ser tratada, onde o isótopo radioativo utilizado emite energia e age nas células tumorais, por um tempo determinado de acordo com a dose prescrita. É uma modalidade amplamente utilizada, tendo suas principais aplicações no tratamento de tumores ginecológicos, de próstata,

cabeça e pescoço, mama, pele, sarcomas, entre outros (COI, 2021). Com o avanço tecnológico do uso de fontes radioativas com alta taxa de dose (HDR, *high dose rate*) o sistema de carregamento remoto tornou-se bastante difundido, devido sua rapidez na execução dos tratamentos permitindo o tratamento de diversos pacientes nas rotinas de trabalho, além de maior segurança fornecida aos operadores das fontes.

Uma unidade de braquiterapia remota contém uma única fonte de radiação e entre materiais radioativos utilizados estão o Cobalto 60, Césio 137 e frequentemente o Irídio 192.

*Figura 1 Dimensões de fonte utilizada em braquiterapia de alta taxa de dose.*



Fonte: PTB, 2015.

Para a realização do tratamento, os aplicadores são inseridos pelo médico na região de interesse a ser tratada (cavidade uterina, lúmen, região perineal) e após, são realizadas radiografias para verificação do posicionamento destes aplicadores. O físico médico simula a distribuição de dose do tratamento em um sistema de planejamento computadorizado considerando o posicionamento e tipo de aplicadores utilizados. Em conjunto com o médico radio-oncologista avalia a distribuição de dose nos órgãos de risco e na região a ser tratada. Uma vez que o planejamento esteja pronto para ser executado, os aplicadores inseridos na paciente são conectados por uma guia com o cofre que contém a fonte. O físico médico, aciona remotamente a ejeção da fonte radioativa até a posição de tratamento por meio do console do equipamento. Após transcorrido o tempo de tratamento programado, a fonte é imediatamente recolhida pelo próprio equipamento. Durante o tratamento luzes advertindo a presença de radiação são acionadas, assim como sinal sonoro. Além disso, o sistema de segurança do equipamento de braquiterapia é capaz de detectar qualquer mal funcionamento do equipamento durante a execução dos procedimentos. Na ocorrência de qualquer discrepância ou falha do equipamento, o físico médico responsável é acionado.

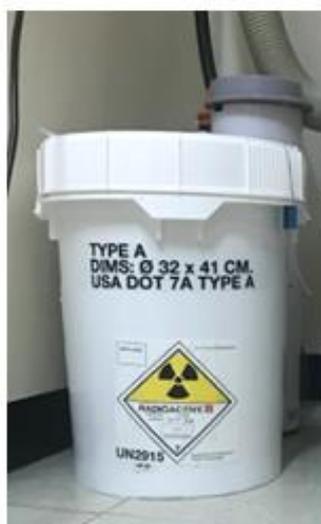
Para que a fonte opere com alta taxa de dose, as fontes são trocadas conforme sua meia-vida, dependendo do material radioativo utilizado. O processo de troca de fonte ocorre periodicamente, conforme a meia-vida do material radioativo utilizado e envolve a chegada de uma nova fonte dentro de um recipiente blindado contido dentro de um balde lacrado. A fonte é trocada por empresa especializada e ao ser retirada, volta para seu balde de origem, onde permanece aguardando reexportação.

*Figura 2 Unidade de tratamento de braquiterapia.*



Fonte: Imagem da Autora.

*Figura 3 Balde blindado contendo fonte exaurida retirada de operação.*



Fonte: Imagem da Autora.

### **3.3 Regulamentação para utilização de fontes radioativas nas práticas clínicas**

De acordo com os dados do relatório do Plano de Desenvolvimento de Radioterapia para a Próxima Década (RT 2030, 2021), no Brasil, operam atualmente com 10 unidades de cobalto terapia e 99 unidades de braquiterapia (97% das unidades com unidades HDR). Para que estas fontes radioativas possam ser utilizadas de maneira segura, são necessários atos e medidas organizacionais que promovam a segurança das pessoas e do meio ambiente, bem como atos e medidas que protejam as fontes radioativas de possíveis ações maléficas, como roubo ou sabotagem (IAEA 2019). Para tanto, o órgão regulador nacional, Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, exige que as instalações que utilizem fontes radioativas para fins terapêuticos, operem de acordo com os requisitos estabelecidas pelo órgão nas normativas em vigor em relação a proteção radiológica, de acordo com a normativa 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, em vigor desde 2005, e em relação a proteção física das fontes radioativas, de acordo com a normativa 2.06 Proteção Física de Fontes Radioativas e Instalações Radiativas Associadas, em vigor desde 2019.

#### **3.3.1 Proteção radiológica e proteção física de fontes radioativas**

A proteção radiológica reúne o conjunto de ações que visam proteger as pessoas e o meio ambiente contra possíveis acidentes envolvendo fontes radioativas ou a efeitos não desejados das radiações ionizantes, para isto reúne um conjunto de medidas legais, técnicas e administrativas para que as exposições sejam reduzidas a valores tão baixos quanto razoavelmente exequíveis (CNEN, 2020). Sua premissa é proteger algo ou alguém de um determinado evento indesejado, no caso, da exposição potencial que envolve o uso de fontes radioativas (CNEN, 2005). A proteção física, por sua vez, pretende defender as fontes radioativas de ameaças ou de ataques maléficos por um indivíduo ou grupo de indivíduos (adversários), ou seja, proteger algo (fontes) de alguém.

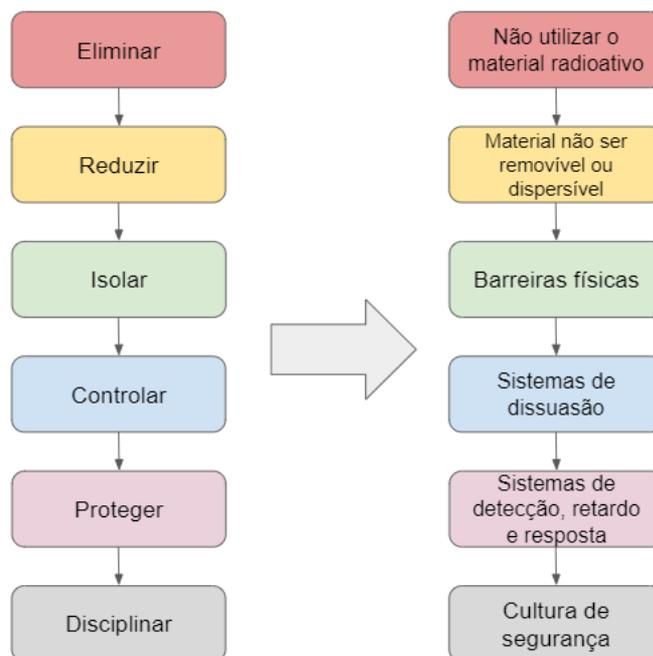
Uma vez que as palavras oriundas do inglês “safety” e “security” se traduzem para uma mesma palavra em português (segurança), neste trabalho elas serão diferenciadas pelos termos “proteção radiológica” (safety) e “proteção física” (security). O termo segurança, oriundo de “safety” também pode se aplicar a proteger pessoas ou meio ambiente de desastres naturais como inundações, terremotos ou de eventos acidentais, como incêndios etc. (GARCIA, 2008). As duas ações, proteção radiológica e proteção física, podem se sobrepor, como por exemplo, um acidente envolvendo fontes de radiação

fora de controle implicará na execução das mesmas ações remediadoras e protetoras, sendo este evento causado tanto por um desastre natural ou acidente radiológico proveniente de uma prática, quanto como num acidente causado por ataques terroristas. A diferenciação no tratamento entre os dois casos está na capacidade que sistemas que envolvem indivíduos têm em burlar procedimentos ou barreiras de segurança (GARCIA, 2008).

As ações de proteção radiológica já são claramente estabelecidas pelos órgãos nacionais e executadas durante as práticas que utilizam radiação ionizante (CNEN, 2017), por outro lado, a preocupação com a segurança física das fontes radioativas ganhou força mundialmente com o alarde à construção de possíveis *bombas-sujas* após os ataques às torres americanas em de 11 de setembro de 2001 (MONTEIRO, 2020; VAZ, 2016), e sua adequação às fontes utilizadas nas práticas clínicas é um tema atual, tendo sua regulamentação iniciada no país a partir da Normativa Nuclear 2.06, que estabelece os princípios gerais e requisitos básicos exigidos para a proteção física de fontes radioativas e instalações radiativas associadas (CNEN, 2019).

A normativa supracitada define por “instalação radiativa” o espaço físico, local, sala, prédio onde se utilize, produza, processe, distribua ou armazene fontes radioativas. Para estas instalações, um sistema de proteção física (SisPF) deve ser estruturado com o objetivo de proteger as fontes de roubo e remoções não autorizadas, contribuir para a recuperação destas fontes em caso de remoção ou desaparecimento e minimizar ou mitigar os efeitos dessa remoção. A remoção não autorizada define-se como furto, roubo ou qualquer forma de remoção ilegal das fontes de radiação por indivíduos ou grupo de indivíduos, definidos como adversários. Para que estas ações sejam evitadas, um gerenciamento de risco de proteção física deve ser delineado, seguindo a hierarquia apresentada na figura abaixo, (WINS, 2010):

Figura 4 Estrutura de gestão hierárquica para a proteção física de fontes radioativas.



Fonte: Adaptado de: WINS, Security by Design, 2010

- **Eliminar o risco:** analisar a possibilidade de realizar a mesma prática, sem utilizar o material radioativo, como por exemplo, a substituição de fontes de Co-60 para o uso de aceleradores lineares.
- **Reduzir o risco:** utilizar o material radioativo sob outra forma, por exemplo, uma forma não removível ou não dispersível.
- **Isolar o material:** inserir barreiras físicas ao redor do material, utilizar portas com controle de acesso a fim criar resistência à entrada de adversários.
- **Controlar o risco:** a presença de guardas no local de armazenamento das fontes, meios que possam dissuadir adversários, como placas sinalizando que a área está sujeita a patrulhamento ou que o ambiente é vigiado, presença de câmeras de segurança.
- **Proteger a área:** utilizar câmeras de segurança com monitoração permanente, presença de guardas, sistemas alarmes sonoros em caso de intrusão na intenção de detectar sabotagem ou intrusão, além de grades, travas e barreiras próximas ao material que sirvam para retardar os adversários;

- **Disciplinar:** estabelecer uma cultura de segurança com procedimentos bem descritos e treinamentos aos funcionários envolvidos no uso das fontes.

### **3.4 Requisitos para um sistema de proteção física**

As instalações que utilizam fontes radioativas em suas atividades devem estabelecer um Sistema de Proteção Física (SisPF) que integre procedimentos, equipamentos e pessoas com intenção de proteger instalações contra ameaças ou atos maléficos, como roubo ou sabotagem. Esses atos maléficos, entendidos como a sequência de ações empreendidas por um adversário para obter acesso ao material radioativo, com fins de sabotagem ou remoção, podem ter como objetivo o uso deste material para fins terroristas com a construção de bombas sujas ou dispositivos de dispersão radiológica (MONTEIRO, 2019). O sistema deve também considerar seus possíveis adversários, como externos: grupos terroristas ou ativistas, por exemplo; e adversários internos: indivíduos com acesso às fontes radioativas ou a informações relativas à segurança destas fontes.

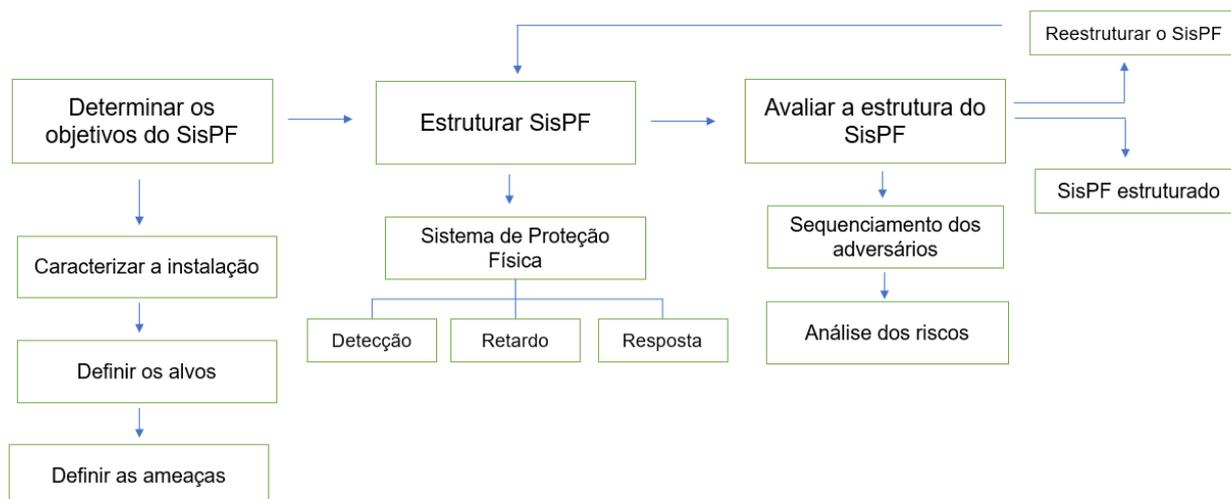
Para que este sistema seja estabelecido um Plano de Proteção Física (PPF) deve ser elaborado e submetido aos órgãos reguladores competentes para avaliação e aprovação, sendo este um documento sigiloso que irá descrever todos os mecanismos de detecção, retardo e resposta da instalação bem como a integração de seus subsistemas e descrição de sua manutenção e funcionalidade (TAVARES, 2018).

O projeto deve contar primeiramente com um sistema de defesa em profundidade onde sucessivas camadas de proteção (barreiras) são adicionadas com maior dificuldade de serem ultrapassadas à medida que o adversário se aproxima da fonte radioativa. Após isto, um sistema de redundância contra falhas de componentes deve ser projetado de maneira que, havendo a falha ou sabotagem de algum item do sistema de segurança, outro item possa cumprir com a função a qual o item de origem se destinava. Por terceiro, a proteção física do material radioativo deve ser balanceada, de modo que qualquer via de acesso ao alvo deve prover o mesmo grau de proteção à fonte radioativa (GARCIA, 2008).

A proposta final do sistema de segurança é garantir a integridade dos seres humanos, indivíduos ocupacionalmente expostos e da comunidade nacional e global (WINS, 2010). Para que este sistema seja efetivo, sua construção deve ponderar seus objetivos em relação aos recursos disponíveis avaliando o sucesso dos objetivos propostos de maneira que não apresente falhas na proteção de pontos críticos da instalação sem que as medidas de proteção sejam utilizadas de maneira excessiva (GARCIA 2008). As definições estruturais para um sistema de proteção física e sua posterior avaliação pode

ser representadas de acordo com o diagrama da figura 5, chamado de *Perfil do Processo de Projeto e Avaliação* (DEPO) proposto pelo Sandia National Laboratories (SNL):

Figura 5 Definição do perfil do processo de projeto e avaliação de um SisPF (*Design and Evaluation Process Outline, DEPO*)



Fonte: Adaptado de Garcia, 2008.

O sistema deve prevenir a remoção não autorizada dos materiais radioativos como sua prioridade, de acordo com os principais elementos (WILLIAMS, 1997) e (GARCIA, 2008):

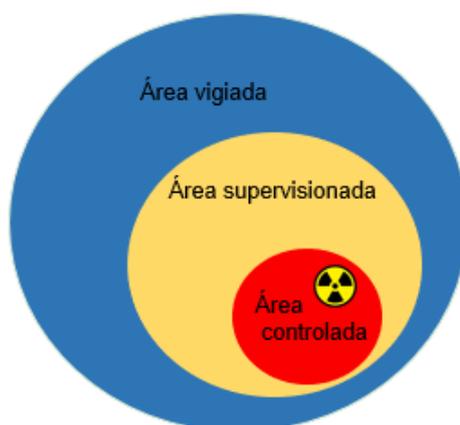
- Determinar os objetivos do SisPF: conhecer a instalação e o que é necessário proteger, as características de seus fluxos operacionais e então estudar os adversários que o SisPF deve combater. Por fim, identificar as áreas mais importantes que devem ser protegidas dos adversários;
- Estruturar o SisPF: identificar as barreiras de proteção já existentes e adicionar elementos necessários de proteção;
- Avaliar a estrutura do SisPF: com base na definição das ameaças, dos alvos e da estrutura do projeto, analisar a efetividade do sistema de proteção física, de acordo com metodologia proposta, como a DEPO, *Design and Evaluation Process Outline* ou Perfil do Processo de Projeto e Avaliação).

### 3.4.1 Caracterização de instalações utilizando fontes radioativas

#### a) Classificação das áreas de segurança:

- Áreas vigiadas: considerada como a área mais externa da instalação com controle de acesso, contendo as áreas de segurança supervisionadas e controladas.
- Áreas supervisionadas: considera as áreas sujeitas a regras especiais de segurança com finalidade de proteger contra o acesso às áreas controladas de segurança.
- Áreas controladas: são as áreas com regras especiais de segurança e sua proteção tem a finalidade de impedir o acesso não autorizado às fontes radioativas.

Figura 6 Representação das camadas de proteção crescente das áreas de segurança



Fonte: Adaptado de CNEN, 2019.

#### b) Categorização da proteção física das fontes radioativas:

Os requisitos de proteção às fontes radioativas são categorizados de acordo com níveis de proteção gradual, onde deve-se aplicar o grau adequado para cada categoria baseado nas consequências radiológicas prejudiciais que podem resultar da sucessão de atos maléficos envolvendo o material radioativo a ser protegido. As fontes são divididas em três níveis de segurança: A, B e C, sendo o nível A o mais alto nível de segurança, e os níveis B e C progressivamente tendo regras menos restritivas.

- Nível A: alto nível de proteção contra remoção não autorizada;
- Nível B: nível de proteção intermediário contra remoção não autorizada;
- Nível C: nível de proteção básico contra remoção não autorizada.

De acordo com os níveis de proteção a CNEN (CNEN, 2019) e a IAEA (IAEA, 2019) descrevem os objetivos e subobjetivos de proteção física, de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 1 Funções e objetivos da proteção física

Funções de proteção física	OBJETIVOS DA PROTEÇÃO FÍSICA		
	NÍVEL A	NÍVEL B	NÍVEL C
Detecção	Detectar imediatamente o acesso não autorizado à fonte ou área controlada		
	Detectar imediatamente qualquer tentativa de remoção não autorizada da fonte radioativa	Detectar a remoção não autorizada da fonte radioativa	
	Avaliar imediatamente a detecção.		
	Comunicar imediatamente ao pessoal de resposta.		
	Ter meios para detectar a perda da fonte através de verificação.		
Retardo	Criar um retardo suficiente após a detecção, para que o pessoal de resposta interrompa e evite a remoção não autorizada	Criação de retardo para reduzir a possibilidade de remoção não autorizada.	
Resposta	Responder imediatamente a um alarme avaliado com recursos suficientes para parar e impedir a remoção não autorizada.	Iniciar de imediato a resposta para interromper a remoção não autorizada	Tomar medidas apropriadas no caso de remoção não autorizada de fonte

Fonte: CNEN, 2019.

### c) Categorização dos alvos:

Um dos primeiros passos para estruturar um sistema de proteção física é a determinação de quais bens da instalação necessitam ser protegidos contra eventos indesejados. Para tanto os alvos a serem protegidos são divididos em duas categorias: materiais que são alvo de sabotagem e os que são os alvos de roubo.

- **Alvos de roubo:** a definição dos alvos de roubo é caracterizada por definir quais materiais devem ter sua remoção não autorizada. São os materiais a serem protegidos pelo sistema de proteção física, sendo, tipicamente os materiais radioativos. Também devem estar protegidos contra roubo, documentos relacionados à gestão de segurança destes materiais, que também não devem ter seu conteúdo reproduzido. Para que se identifique os alvos de roubo, um inventário deve ser feito na instalação, determinando o número de fontes radioativas presentes; classificar os materiais de acordo com seu nível de proteção considerando a legislação em vigor, bem como os possíveis eventos indesejáveis envolvendo este material e possíveis consequências e determinar as áreas de segurança física onde este material está localizado.

- **Alvos de sabotagem:** a definição destes alvos envolve maior complexidade e geralmente se aplica a uma série de materiais-alvo, incluindo desde o próprio material radioativo como os equipamentos associados à segurança física e radiológica destes materiais. Para a identificação destes alvos um inventário deve ser feito na instalação, determinando o número de fontes radioativas presentes e quais são os materiais associados à sua proteção nos quais um dano causado pode levar a consequências de perigo radiológico; classificar os materiais de acordo com seu nível de proteção, bem como os possíveis eventos indesejáveis envolvendo este material e possíveis consequências e determinar as áreas de segurança física onde estes materiais estão localizados.

d) Definição das ameaças:

Uma ameaça pode ser definida como um indivíduo ou grupo de indivíduos com motivações e capacidades de realizar atos maléficos contra as instalações (nucleares ou radioativas) ou materiais radioativos. A capacidade desse grupo ou indivíduo inclui quais são recursos financeiros, técnicos e humanos para realizar os atos maléficos contra os alvos (CNEN, 2020). Na estruturação ou na avaliação de um SisPF deve ser realizado um delineamento das possíveis ameaças definindo os potenciais alvos de ataques, quais os tipos de adversários, suas intenções e capacidades para performar o ato maléfico. A definição das ameaças dará a ideia do que deve ser protegido e como deve ser protegido (NSSEP, 2021).

e) Categorização dos adversários:

Na estruturação de um sistema de proteção física devemos definir os adversários, e as ameaças contra os alvos. Um adversário é definido como um indivíduo ou grupo que concretiza as ameaças, tentando executar ou executando um ato maléfico contra as instalações (nucleares ou radioativas) ou materiais radioativos (CNEN, 2020). As ameaças normalmente podem ser provenientes de adversários internos, externos ou externos combinadas de adversários externos com auxílio de adversários internos.

- **Adversários internos:** incluem qualquer indivíduo com acesso autorizado à instalação com conhecimentos sobre os seus sistemas de segurança. Os adversários internos podem ser passivos, onde o indivíduo não atua ativamente nas operações, apenas fornece informações sobre os procedimentos de segurança ou

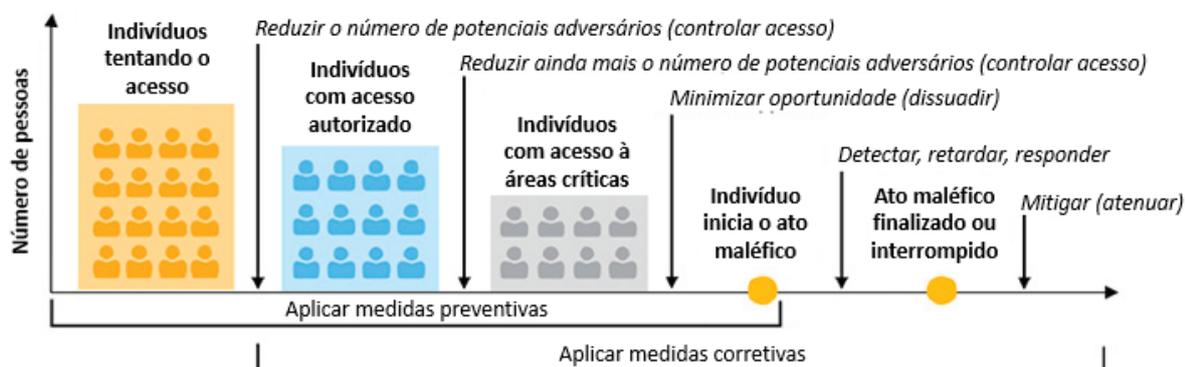
sobre os alvos; ativos não violentos, participam assistindo as operações, facilitando ações dos executores da ameaça; ativos violentos, participando do ataque maléfico.

- **Adversários externos:** indivíduos ou grupo de indivíduos que podem ter motivações terroristas, ideológicas, políticas, filosóficas ou religiosas; econômicas, como ganhos financeiros agregados ao material radioativo; ou pessoais: um indivíduo, ou ex-funcionário que queira insultar outro indivíduo ou a instalação.
- **Adversários externos com colaborações internas:** combina os indivíduos dos dois tipos de adversários supracitados.

### 3.4.1 Ações de proteção física: dissuasão, detecção, retardo e resposta

O sistema de proteção física deve ser projetado de forma a existir uma combinação de múltiplas camadas de sistemas (defesas em profundidade), elementos e ações na instalação, com intuito de proteger os alvos (fontes radioativas) de atos maléficos (furto, roubo, sabotagem ou qualquer outra forma ilegal de retirada das fontes radioativas). A Figura 7 ilustra esquematicamente os diversos elementos do sistema de proteção física da instalação (controle de acesso, dissuasão, detecção, retardo, resposta e mitigação) atuando em camadas de segurança. Todas essas medidas devem ser integradas para que o sistema de proteção física atinja seus objetivos. Estas ações de proteção física estão descritas abaixo de acordo com a IAEA, 2019.

Figura 7 Elementos do sistema de proteção física



Fonte: adaptado por Radicchi, L.A. de IAEA, 2019.

#### a) Elementos de dissuasão

Os elementos de dissuasão têm como objetivo desmotivar um adversário a agir maleficamente diminuindo as tentativas de ataques às fontes e a instalação. As medidas de dissuasão iniciam-se na intenção de alarmar o adversário da presença de medidas de

segurança. Dentre os mecanismos de dissuasão estão a presença de placas de advertência, a presença de câmeras, a presença da equipe de segurança, além de grades e cercas demonstrando o grau de proteção do local. A atenção deve ser tomada ao informar sobre algumas medidas de segurança, o que pode fazer com que os adversários elaborem planos para contorná-las.

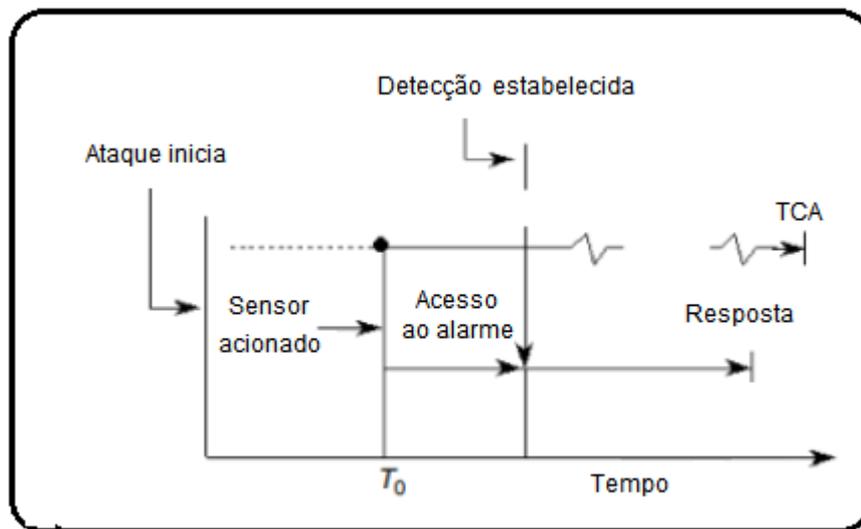
#### **b) Elementos de detecção**

Os elementos de detecção têm como objetivo identificar uma ameaça ou uma intrusão real que pode levar a sabotagem ou remoção não autorizada das fontes radioativas. Uma vez que algo é detectado ele precisa ser avaliado: mesmo que muitas vezes existam incertezas na causa dos alarmes, o disparo de algum dispositivo sonoro, ou percepção de ações duvidosas devem ser avaliados por um indivíduo que possa julgar e investigar suas causas assim que possível. Entre os mecanismos de detecção estão as ações de observação do local e arredores que contém a fonte, vigilância por câmeras, avaliação das câmeras de vigilância e sensores eletrônicos vinculados a alarmes sonoros. As detecções podem ser imediatas ou subsequentes aos atos de sabotagem e remoção. A detecção de um adversário deve, preferencialmente, anteceder as medidas para retardar suas ações.

#### **c) Elementos de Retardo**

Os elementos de retardo têm como objetivo diminuir o progresso de um adversário na tentativa de completar o ato maléfico. A efetividade do retardo é alcançada quando o período após a detecção da ação maléfica ( $T_D$ ) até a resposta a esta ação é menor do que o período que o adversário necessitaria para concluir sua ação ( $T_{CA}$ ), ou seja, remover ou sabotar o material radioativo. A função dos elementos de retardo é exemplificada na figura 8.

Figura 8 Diagrama exemplificando o papel dos mecanismos de retardo após a detecção em  $T_0$



Fonte: Adaptado de GARCIA, 2008.

Os mecanismos de retardo devem fornecer aumento de tempo para que uma tentativa de acesso, remoção ou sabotagem do material radioativo ocorra, dando maior tempo para ação de forças de respostas agirem, ou seja, diminuir o tempo para que a detecção seja estabelecida ( $T_D$ ) e aumentar o tempo do adversário após sua detecção em  $T_0$ . Entre os mecanismos de retardo estão geralmente obstáculos físicos, que necessitam ser destruídos ou penetrados, como por exemplo, portas, acessos com senha ou digital, trancas, travas, cadeados e paredes.

#### d) Elementos de Resposta

Os elementos de resposta têm por objetivo agir após a detecção e sua avaliação. De acordo com o nível de segurança da fonte (definidos na tabela 1 como A, B ou C), as ações de resposta podem ser imediatas, suficientes para interromper o ato maléfico, ou posteriores, onde as forças de apoio locais notificadas investigam o evento, em conjunto com a cooperação das forças de resposta. Os funcionários da instalação e da força de resposta (operadores do serviço de segurança interno da instalação devidamente destinado a agir neste tipo de evento) devem ter meios para se comunicar, entre si e com as forças de apoio (organizações de segurança pública externas) para que eles realizem a resposta, quando aplicável. Os meios de comunicação para início das ações de resposta devem ser rápidos como telefones fixos ou móveis, sistema de rádio ou dispositivos móveis de comunicação operados por duas pessoas.

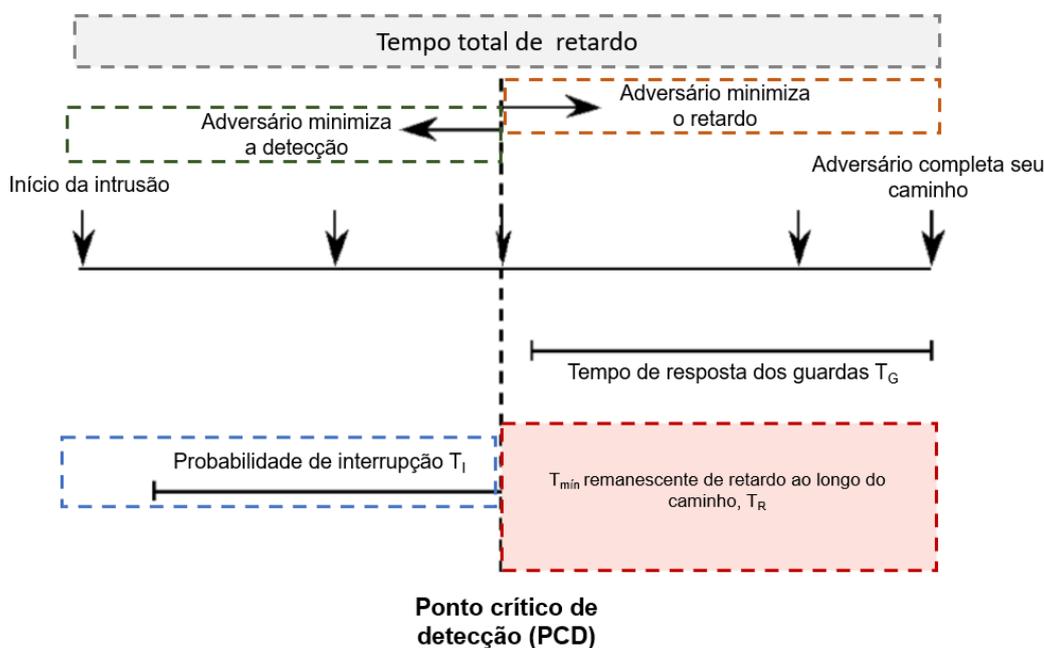
### **e) Gestão da segurança**

A gestão de segurança tem o objetivo de estabelecer e implementar as políticas, planos e procedimentos para a segurança do material radioativo, suas instalações e atividades associadas. A gestão da segurança inclui medidas de controle de acesso, treinamento e qualificação de profissionais, critérios de contratação e de confiabilidade dos funcionários, proteção da informação, inventários e comunicação de eventos. As informações que dizem respeito à segurança física das fontes devem ser protegidas: precisam estar disponíveis às partes responsáveis, porém com restrição de acesso.

### **f) Análise de caminhos**

Como previamente mencionado, a análise de caminhos é uma ferramenta utilizada na metodologia DEPO para avaliar a estrutura do SisPF e consiste em delinear sequencialmente os elementos de proteção física que o adversário encontra em seu caminho. Em cada caminho o adversário terá que superar diferentes elementos com diferentes números de componentes de detecção e retardo do sistema de proteção física a fim de completar seu objetivo (TAVARES, 2018). Para esta análise é necessário definir-se o *ponto crítico de detecção* (PCD) o qual seria o último ponto (área/barreira/sensor) no caminho percorrido pelo adversário o qual a detecção oportuna deve ocorrer, como exemplificado na figura 9. Esta detecção oportuna refere-se a um tempo de detecção superior ou igual ao tempo de TCA no qual as forças de resposta poderiam responder, chegando a tempo de interromper o adversário de concluir sua ação (NSSEP, 2021).

Figura 9 Diagrama destacando o momento da detecção oportuna a fim de medir a eficácia do sistema de segurança



Fonte: Adaptado de GARCIA, 2008.

O tempo total para a concretização da ameaça, inicia-se assim que o adversário realiza a intrusão, na primeira seta da esquerda para direita. No início da trajetória o objetivo do adversário é a intrusão sem sua detecção, de maneira que a probabilidade de sua interrupção é mínima. No centro deste caminho está o PCD, intervalo mínimo necessário para que as forças de resposta atuem a fim de neutralizar o adversário que no restante da trajetória tentara atravessar suas etapas da maneira mais rápida possível, minimizando o retardo.

### g) Procedimentos de contingência

As ações de contingência devem ser iniciadas logo após a detecção de ameaças ou atos maléficos às fontes radioativas ou às barreiras de segurança. Os procedimentos realizados devem assegurar uma resposta efetiva em tempo hábil para qualquer evento que coloque em risco a segurança física da instalação.

### h) Avaliação da efetividade do sistema de proteção física

Tendo em vista avaliar a efetividade de um SisPF, em um diagrama de sequência de intrusão (DSI) podem ser delineadas os possíveis caminhos de intrusão e fuga da

instalação, prevendo os tempos associados aos mecanismos de retardo as probabilidades de detecção para pôr fim avaliar a eficácia do mecanismo de resposta. Ao longo de cada caminho delineado a avaliação da probabilidade de interrupção ( $P_I$ ) é utilizada para determinar a efetividade do sistema (NSSEP, 2021). Esta medida traduz a probabilidade do adversário ser detectado e interrompido em tempo hábil pelas forças de resposta.

A  $P_I$  é descrita como as probabilidades não exclusivas e cumulativas dos pontos de detecção oportunos ao longo dos caminhos do adversário, partindo geralmente de um ponto externo até um ponto interno, onde encontra-se a fonte. Ela pode ser definida como:

$$P_I = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times \dots (1 - P_{DN})] \quad (\text{equação 1})$$

Onde  $P_{DN}$  é a probabilidade de detecção de cada ponto ao longo da trajetória.

Ao percorrer este caminho o adversário experimentará diferentes ações que devem ser executadas até que sua meta seja atingida. A cada ação é associada a um tempo diferente de retardo e uma probabilidade de detecção.

Se o adversário é interrompido, o conceito de probabilidade de neutralização ( $P_N$ ) indica a probabilidade de ele ser “parado” pelas forças de resposta. A probabilidade de neutralização pode ser obtida de diferentes fontes de dados tabelados, exercícios de mesa, simulações computadorizadas ou simulações reais.

A  $P_I$  e a  $P_N$  quando relacionadas expressam a probabilidade de eficácia do SisPF ( $P_E$ ), de acordo com:

$$P_E = P_N \times P_I \quad (\text{equação 2})$$

Se considerarmos de forma conservativa que a probabilidade de ataque ao alvo  $P_A = 1$ , ou seja existe 100% de chances de a fonte sofrer sabotagem ou roubo, temos a seguinte relação para definir o risco condicional ( $R_C$ ):

$$R_C = P_A \times (1 - P_E) \times C \quad (\text{equação 3) então,}$$

$$R_C = (1 - P_E) \times C \quad (\text{equação 4)}$$

Onde  $C$  é a medida das consequências se se o adversário tiver sucesso em concretizar a ameaça.

#### 4. METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa utilizou as premissas de segurança de instalações que possuem itens com valores associados que devem ser protegidos, uma vez que podem oferecer riscos potenciais à população em geral e/ou ao meio ambiente. Para tanto um projeto conceitual de um sistema de proteção física (SisPF) para uma instalação que utiliza fontes radioativas nas práticas clínicas foi desenvolvido:

- Elaboração de um layout de um serviço de radioterapia: a fim de preservar o princípio de confidencialidade do sistema de proteção física (CNEN, 2019), um layout fictício de um serviço de radioterapia foi desenvolvido utilizando o software de criação de diagramas *Lucidchart*. O projeto da instalação teve base em instalações originais e nas recomendações da publicação *Radiotherapy Facilities: Master Planning and Concept Design Consideration* da IAEA (IAEA, 2014). Este documento considera aspectos ambientais, técnicos e profissionais para a construção de uma instalação de referência de radioterapia. Esta instalação considera o uso de fontes radioativas em um equipamento contendo uma fonte selada, utilizada para fins de braquiterapia de alta taxa de dose.
- Utilizando a metodologia DEPO (*Design and Evaluation Process Outline* ou Perfil do Processo de Projeto e Avaliação) desenvolvida pelo Sandia Laboratories e representada pela figura 5, a estrutura do SisPF foi então dividida em:
  - a) Definição dos objetivos de proteção física.
  - b) Definição dos alvos e áreas de segurança: os alvos de roubos e/ou de sabotagem elaborada foram definidos no projeto estrutural elaborado e as áreas da instalação divididas em: áreas de segurança vigiadas, áreas de segurança supervisionadas e áreas de segurança controladas de acordo com sua localização em relação aos alvos.
  - c) Definição de ameaças: foram postulados cenários possíveis de ataque aos alvos, definindo-se os grupos de adversários de acordo com sua categorização, suas motivações e táticas.
  - d) Elaboração do Sistema de Proteção Física: para cada uma das áreas foram identificados os fluxos de pessoal e controle de acesso e partindo desta descrição serão estabelecidos os requisitos mínimos e principais relativos à segurança das fontes como: sistema de defesa em profundidade e barreiras utilizadas; sistemas de detecção, retardo e

resposta, planos de contingência em caso de extravio de fontes radioativas.

- e) Avaliação da efetividade do sistema de proteção física: com a análise de caminho único, avaliar a efetividade do sistema de proteção física. Para isto foram analisadas as probabilidades de interrupção, neutralização do um SisPF em questão para então avaliação de eficácia.

Como referência para o desenvolvimento deste projeto serão utilizadas as recomendações da IAEA acerca de segurança física (IAEA, 2019; IAEA, 2020), a normativa brasileira CNEN 2.06 e materiais provenientes dos cursos oferecidos no portal educacional Nuclear Safety and Safeguards, NSSEP.

#### 4.1 Objetivos do Sistema de Proteção Física (SisPF)

Os objetivos principais de um SisPF, de acordo com a norma CNEN 2.06 (CNEN, 2019) são:

- Promover a proteção das fontes radioativas contra roubo, furto ou qualquer outra forma de remoção não autorizada;
- Em caso de remoção não autorizada, o SisPF deve contribuir para a recuperação destas fontes;
- O SisPF deve proteger as fontes e as instalações de ações não autorizadas, em especial de sabotagem;
- Mitigar ou contribuir para minimizar os efeitos que uma ação de sabotagem pode causar na instalação radiativa.

Para tanto, o projeto do sistema de proteção física, além dos requisitos de proteção física das fontes CNEN (2019), deve considerar a prevenção de acidentes e proteção radiológica (CNEN, 2005):

1. As áreas de segurança vigiadas, supervisionadas e controladas devem ser classificadas e delimitadas;
2. As áreas de segurança devem ter grau crescente de proteção física, conforme a proximidade da fonte e um sistema de segurança e proteção do tipo barreiras múltiplas deve ser aplicado às fontes e instalação, levando em consideração a intensidade e a probabilidade das exposições potenciais envolvidas, garantindo que qualquer liberação de radiação que possa ocorrer em casos de acidentes seja minimizada por procedimentos e sistemas de segurança;
3. Margens de segurança devem ser incluídas para garantir um desempenho seguro das atividades durante a existência da fonte, com objetivo de prevenir acidentes e mitigar consequências, tanto no presente como no futuro, de maneira que as consequências radiológicas significativas sejam improváveis;
4. Os acessos às áreas de segurança devem ser limitados apenas às pessoas autorizadas e em menor número possível e projetados considerando a compatibilidade com planos para situações de contingência e estimativa de ameaças à proteção física;

5. A exposição à radiação dos indivíduos do público ou de trabalhadores esteja abaixo dos limites estabelecidos em norma durante condições normais de operação;
6. As barreiras físicas que delimitam as áreas de segurança devem ser devidamente sinalizadas e suas áreas de isolamento devem permitir a sua inspeção visual;
7. O número de pontos de acesso para as áreas controladas deve ser o mínimo necessário e, segundo a classificação da instalação, dotados de detecção, alarme e confirmação da intrusão;
8. As barreiras físicas que delimitam a área controlada devem ser projetadas de modo que acidentes geográficos, vegetação ou estruturas não prejudique sua eficácia como barreiras;
9. A barreira física da área controlada deve prover resistência necessária para que, no caso de uma tentativa de intrusão, o retardo seja suficiente para permitir a detecção e a confirmação da intrusão, assim como a resposta em tempo adequado para contê-la;
10. A iluminação da área controlada e da respectiva zona de isolamento deve ser suficiente para permitir a inspeção visual da área e a operação dos dispositivos de detecção, alarme e confirmação da intrusão;
11. As janelas externas de áreas controladas devem ser providas de dispositivos de alarme e protegidas com material resistente, compatível com resistência física das paredes;
12. As saídas de emergência de áreas controladas, devem ser providas de dispositivos de alarme contra intrusão; e
13. Os sistemas de detecção, alarme e confirmação de intrusão devem ser capazes de operar independentemente do fornecimento normal de energia da rede e provocar alarme caso sofram interrupção ou corte.

#### **4.2 Descrição da instalação**

O serviço de radioterapia utilizado como base para a elaboração deste projeto situa-se em uma instalação radiativa de um hospital de grande porte localizado em São Joaquim das Palmeiras. A instalação opera 24h por dia durante 7 dias da semana, para procedimentos emergenciais e das 7h às 19h no atendimento ambulatorial. Ela conta com uma área externa de 8.000 m<sup>2</sup>, área total interna de aproximadamente 2.845 m<sup>2</sup> com um fluxo de

aproximadamente 10.000 pessoas por dia e um quadro funcional de 2.500 colaboradores. A instalação hipotética considera a utilização de equipamentos geradores de radiação para fins de teleterapia e equipamento contendo fonte selada para fins de braquiterapia, sendo classificada pela CNEN 6.02, Licenciamento de Instalações Radiativas, como pertencendo ao Grupo 7C e Grupo 2B, respectivamente. Ainda sobre sua classificação, de acordo com a normativa CNEN 2.06, em termos de proteção física da fonte radioativa, se categoriza como grupo 2B, categoria 2.

Para a técnica de braquiterapia uma fonte radioativa de alta taxa de dose de Irídio-192 é utilizada e os critérios de segurança projetados inicialmente em sua instalação referem-se aos requisitos necessários à proteção radiológica, com objetivo principal de proteger as pessoas e o meio ambiente da exposição potencial à radiação ionizante. A figura abaixo ilustra o mapa de localização da instalação com os principais pontos de acesso. Destaca-se em amarelo, o serviço de radioterapia, em vermelho, a sala contendo a fonte radioativa.

*Figura 10 Diagrama de situação da instalação com principais pontos de acesso externos*



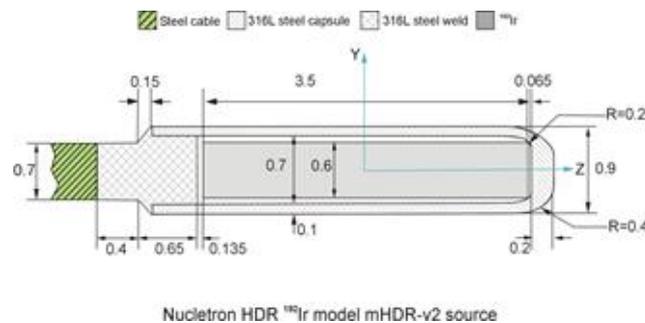
Fonte: Figura da autora.

### **4.3 Descrição do sistema de tratamento de braquiterapia**

O sistema utilizado nos tratamentos de braquiterapia é composto de uma unidade de tratamento que abriga a fonte radioativa, um sistema de controle de tratamento com software dedicado para a operação da fonte e um painel de controle de tratamento. Este sistema é fabricado pela empresa Nucletron/Elekta, modelo Microselectron V2, projetado para receber uma única fonte de Irídio-192. Esta fonte radioativa é uma fonte do tipo selada apresentada

em forma comumente chamada de “pellet”. O Ir-192 emite raios gama de energia máxima de 0,612MeV e energia média de 0,375MeV e possui meia-vida de aproximadamente 74 dias. A fonte radioativa possui dimensões de 0,65 mm de diâmetro e 3,6 mm de comprimento e é contida em uma cápsula cilíndrica de aço de 0,9mm de diâmetro e 4,5mm de comprimento. Esta cápsula é acoplada por solda em um cabo de metal flexível que em sua outra ponta é fixado por solda dentro da unidade de tratamento.

Figura 11 Dimensões de fonte de Irídio 192 Nucletron, modelo mHDR v2



Fonte: ESTRO, 2021

As fontes são comumente fabricadas para que, no momento de início de operação, ou seja, em sua troca, tenha uma atividade de em torno de 10Ci, permanecendo em operação até atingirem um valor mínimo para serem consideradas de alta taxa de dose, cumprindo as exigências estabelecidas em legislação. (CNEN, 2014)

O equipamento contém um “cofre” de tungstênio para abrigar a fonte radioativa e seu peso total é de 120 kg. Suas dimensões são descritas conforme figura abaixo:

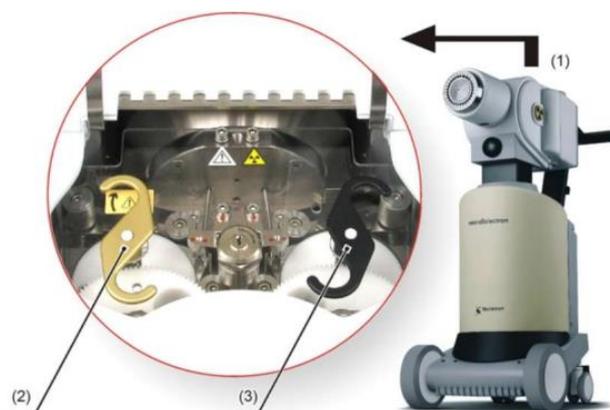
Figura 12 Dimensões do equipamento de braquiterapia remoto Microselectron V2



Fonte: MicroSelectron Brachytherapy, manual do usuário.

A unidade de tratamento é montada sobre rodas e instalada em sala com blindagem apropriada. O sistema eletrônico da unidade é equipado com codificadores óticos que definem a posição dos cabos que contém a fonte acoplada e asseguram a posição correta tanto da fonte de radiação como do *check-cable*. Portanto, qualquer discrepância entre a posição pretendida da fonte e sua posição real resulta no cancelamento de sua movimentação e retorno ao cofre. O sistema também conta com dispositivos que permitem que a fonte se movimente apenas para frente durante o acionamento. Antes da fonte ser exposta um sistema de conferência (*check-cable*) é liberado a fim de assegurar que a fonte irá percorrer o caminho pretendido corretamente e sem interferências. A unidade de tratamento é equipada com um sistema de manivela de emergência (dourada) que permite a retração manual da fonte e do *check-cable* (preta) caso haja alguma falha no motor de parada de emergência. Esta manivela permite somente a retração da fonte, não sua exposição.

Figura 13 Equipamento de braquiterapia remoto (1) e sistema de manivelas para retração manual do cabo da fonte (2) e *check-cable* (3).



Fonte: MicroSelectron Brachytherapy, manual do usuário.

O sistema possui duas chaves de segurança, uma no console de tratamento e outra no próprio equipamento, onde a fonte somente pode ser acionada quando estas chaves se encontram na posição de liberação.

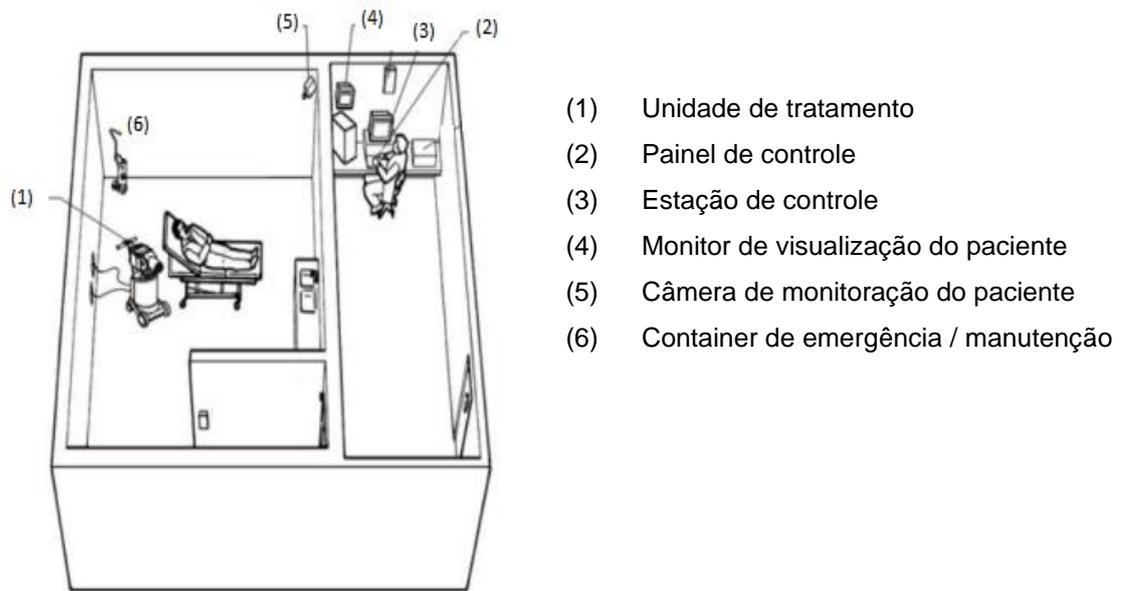
Os procedimentos de segurança descritos no manual operacional do equipamento são relacionados abaixo:

1. Este dispositivo é projetado para que a fonte radioativa seja recolhida ao cofre de tungstênio se qualquer alarme ou condição de falha aparecer.
2. Se o tratamento for interrompido por qualquer razão, a fonte é retraída para o cofre de segurança em aproximadamente 5 segundos.

3. É impossível deslocar a fonte para fora do cofre a não ser que um aplicador esteja corretamente conectado, a porta da sala de tratamento esteja fechada e o cabo de conferência de trânsito da fonte (*check-cable*) teste positivo acerca da condição do aplicador do sistema de HDR.
4. Um mecanismo de temporizador duplo está presente. O temporizador principal na unidade de tratamento conta o tempo de permanência real. Assim que a fonte sai do cofre, o temporizador secundário começa a contar. O nível de disparo do temporizador secundário (localizado no painel de controle de tratamento) é definido para o tempo total de tratamento mais o dobro do tempo de transferência. Se a fonte não estiver no cofre quando o temporizador secundário atingir o nível de desarme, um alarme é gerado e o circuito de parada de emergência é ativado.
5. Em caso de falha completa do sistema existe um guincho controlado manualmente, que pode retrainir a fonte em aproximadamente 5 segundos.
6. O interruptor de intertravamento da porta é conectado diretamente à unidade de tratamento. Em todas as circunstâncias, se a porta da sala de tratamento for aberta, a fonte de radiação será recolhida para dentro da blindagem do cofre.
7. Embora o hardware e o software sejam projetados para permitir modos HDR/PDR (alta taxa de dose/baixa taxa de dose) intercambiáveis, um monitor de intensidade de fontes integrado ao sistema evita que a atividade de fonte inadequada seja usada com cada modo.

O sistema para tratamento de braquiterapia também conta com um container de emergência para abrigo da fonte de radiação em casos de emergência ou manutenções. A representação de uma sala de tratamento contendo este sistema é representado na figura 14:

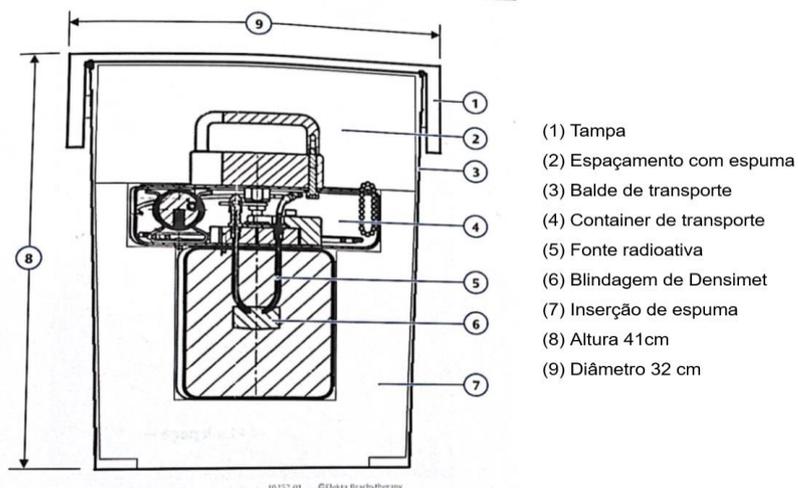
Figura 14 Layout típico de uma sala de braquiterapia HDR



Fonte: MicroSelectron Brachytherapy, manual do usuário.

Na sala de procedimentos de braquiterapia também estão armazenados os baldes que contém as fontes exauridas já retiradas de utilização. Cada balde é lacrado e tem peso total de 24 kg, dentro dele se armazena uma cápsula contendo a fonte retirada de operação conforme descrito na figura abaixo:

Figura 15 Balde de transporte contendo cápsula de fonte radioativa exaurida.



Fonte: MicroSelectron Brachytherapy, Source Return Procedure

Os baldes blindados, são alocados temporariamente (aproximadamente 6 meses) em armário trancado por chave localizado dentro da sala de procedimentos de braquiterapia, uma

vez que esta sala possui blindagem apropriada, acesso controlado e restrito, promovendo sua proteção física e sua proteção radiológica do meio ambiente e daqueles que possam ter acesso ao local de armazenamento ou adjacências, conforme exigido pela normativa CNEN 6.10 e 2.06. As fontes são retiradas de operação quando sua atividade alcança 2,0Ci e permanecem na instalação por aproximadamente seis meses após sua retirada, quando são reexportadas ao país de fabricação. Ao serem removidas da unidade de tratamento ficam armazenadas em uma cápsula de metal blindado por tungstênio e aço<sup>1</sup>. A cápsula é fechada por chave que fica em posse do engenheiro que realiza a troca da fonte.

*Figura 16 Cápsula contendo fonte radioativa exaurida*



Fonte: MicroSelectron Brachytherapy, Source Return Procedure

Na tabela abaixo são descritas aproximadamente as atividades das fontes no seu momento de chegada, retirada de operação e reexportação.

*Tabela 2 Atividades aproximadas da fonte de Ir-192 durante sua permanência na instalação.*

<b>Operação</b>	<b>Atividade (Ci)</b>
Instalação de nova fonte	10 (desejável)
Retirada de operação	5 (desejável) - 2 (mínimo)
Reexportação para país de origem	0,5

Apesar de apresentarem atividades que variam durante o tempo que permanecem na instalação, as fontes são classificadas em uma mesma grupo e nível de proteção pela CNEN, fontes seladas para o uso na modalidade de braquiterapia (2B, nível B).

<sup>1</sup> A medida da exposição externa da cápsula é de aproximadamente 1,5 $\mu$ Sv/h a 10cm de distância, e de valor da ordem ao da radiação de fundo na localização da mesa onde se realiza os tratamentos dos pacientes.

## **4.4 Definição dos alvos e estimativa de ameaças**

### **4.4.1 Definição dos alvos:**

Os possíveis alvos identificados nas áreas vigiadas da instalação são definidos como:

**Alvos de roubo:** fonte radioativa, equipamento contendo a fonte radioativa; cápsula/baldes contendo fontes radioativas exauridas.

**Alvos de sabotagem:** equipamento contendo a fonte radioativa, sistema de contenção deste equipamento, porta de acesso à área que contém a fonte, câmeras de segurança que supervisionam às áreas de segurança controladas, sensores de intrusão.

### **4.4.2 Estimativa de ameaças:**

A partir dos alvos supracitados, foram estabelecidos dois cenários críveis, porém hipotéticos, de ameaças, considerando as características da fonte, a realidade atual brasileira e as condições de operação do serviço de radioterapia.

A instalação conta com uma fonte radioativa em operação e de 1-2 fontes exauridas alocadas na mesma sala de realização dos tratamentos. Em condições normais de operação apenas pessoal autorizado e pacientes pré-agendados entram na sala procedimentos, e a fonte é exposta apenas por carregamento remoto. As condições especiais de operação como em trocas de fonte, manutenções do equipamento e entregas/retiradas das fontes radioativas são considerados os cenários mais vulneráveis às ameaças, uma vez que, apesar de previamente cadastrados, envolvem indivíduos externos à instalação, bem como a manipulação da fonte fora do cofre de armazenamento.

#### **Ameaça 1: Grupo de criminosos**

Agindo com interesses financeiros, grupos do crime organizado atuam nas proximidades da região onde se localiza a instalação. Suas atividades criminosas envolvem o narcotráfico, tráfico ilegal de armas, roubos de cargas, furto e roubo de veículos. Apesar de não terem interesse direto em materiais radioativos, sabem do valor associado a esses materiais, podendo também agir com intenções de extorsão. Suas capacidades técnicas e habilidades são limitadas, porém, são capazes de agir contra alguns dos elementos de proteção física. Este grupo já realizou ataques à caixas eletrônicos e roubos de materiais da instalação levando consigo computadores e monitores portáteis e por isso tem certo conhecimento sobre sua estrutura organizacional, com possíveis ações em conluio com funcionários. Seu objetivo é lucrar financeiramente com a ameaça, sem ataques diretos a

vidas humanas, portanto a severidade do ataque é considerada média. No cenário postulado os criminosos passaram-se por visitantes, atuando em horário normal de atendimento da instalação.

### **Ameaça 2: Grupo terrorista**

Este cenário é caracterizado por indivíduo ou grupo de indivíduos que agem de maneira violenta para alcançar interesses políticos. Grupos terroristas são dotados de conhecimento sobre materiais radioativos, possuem maior poder aquisitivo para seus ataques e armamento necessário para contornar os elementos de proteção física. Seu maior interesse é roubar o material radioativo para utilizá-lo na construção de dispositivos de dispersão ou exposição radiológica, portanto a severidade de seu ataque é alta, considerando a perda de vidas humanas. No cenário postulado o grupo utiliza táticas e/ou violência para alcançar seus objetivos, minimizando ao máximo sua detecção, portanto, realiza o ataque em horário fora do período de atendimento normal da instalação.

Como a quantidade de material radioativo disponível dentro da instalação em questão é pequena, entende-se que o ataque se daria por uma pequena célula individual e, portanto, com recursos escassos para o ataque. Logo, optou-se que apesar da motivação do grupo ser fundamental na análise, a quantidade de indivíduos que participarão efetivamente do ataque é bem reduzida.

### **4.5 Ameaça-base de projeto**

Após delineamento das características da instalação, dos alvos a serem protegidos e das possíveis ameaças a estes alvos, uma ameaça-base de projeto<sup>2</sup> (ABP) foi postulada:

*Tabela 3 Ameaça base de projeto (ABP) para a instalação radiativa analisada*

<b>Característica da ameaça</b>	<b>Grupo de criminosos</b>	<b>Grupo de terroristas</b>
<b>Número de integrantes</b>	3 pessoas	2 pessoas
<b>Tipo de transporte</b>	Veículo terrestre	Veículo terrestre
<b>Armas</b>	Portáteis	Portáteis/bombas
<b>Explosivos</b>	Não	Dinamite
<b>Ferramentas</b>	Mecânicas	Elétricas e mecânicas

<sup>2</sup> Ameaça-Base de Projeto, (ABP); en-US: Design Basis Threat (DBT)): descrição quantitativa, definida pelo Estado, dos atributos e características de um adversário potencial (externo e/ou interno) que possa tentar, sem autorização, remover material nuclear ou outro material radioativo ou tentar um ato de sabotagem, contra o qual o Sistema de Proteção Física de uma instalação ou operação de transporte é projetado e avaliado. (CNEN, 2021)

<b>Característica da ameaça</b>	<b>Grupo de criminosos</b>	<b>Grupo de terroristas</b>
<b>Habilidades técnicas</b>	Médio	Alta
<b>Conhecimento</b>	Baixo	Alto
<b>Conluio com internos</b>	Sim	Sim
<b>Dispostos a matar/morrer</b>	Não	Sim

## **5. PROJETO CONCEITUAL DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO FÍSICA (SisPF)**

O sistema de proteção física foi projetado de acordo com as definições metodológicas do capítulo 4, e a ABP postulada. O SisPF foi delineado de forma a existir uma combinação de múltiplas camadas de sistemas, elementos e ações (“defesas em profundidade”) na instalação, com intuito de proteger os alvos de atos maléficos como furto, roubo, sabotagem ou qualquer outra forma ilegal de retirada das fontes radioativas.

### **5.1 Áreas de segurança e projeto do sistema de proteção física**

O serviço de radioterapia está localizado no prédio Central do Hospital, em seu andar térreo e único. A planta baixa da instalação, com suas respectivas áreas circunvizinhas, é apresentada nas figuras 10 (já citada anteriormente) e 17 (abaixo). O projeto estrutural foi elaborado visando definir m sistema de defesa em profundidade até a chegada da fonte de radiação, sendo definidas as áreas de segurança como vigiadas, supervisionadas e controladas, identificadas na tabela 4.

Figura 17 Planta baixa da instalação com indicação das áreas

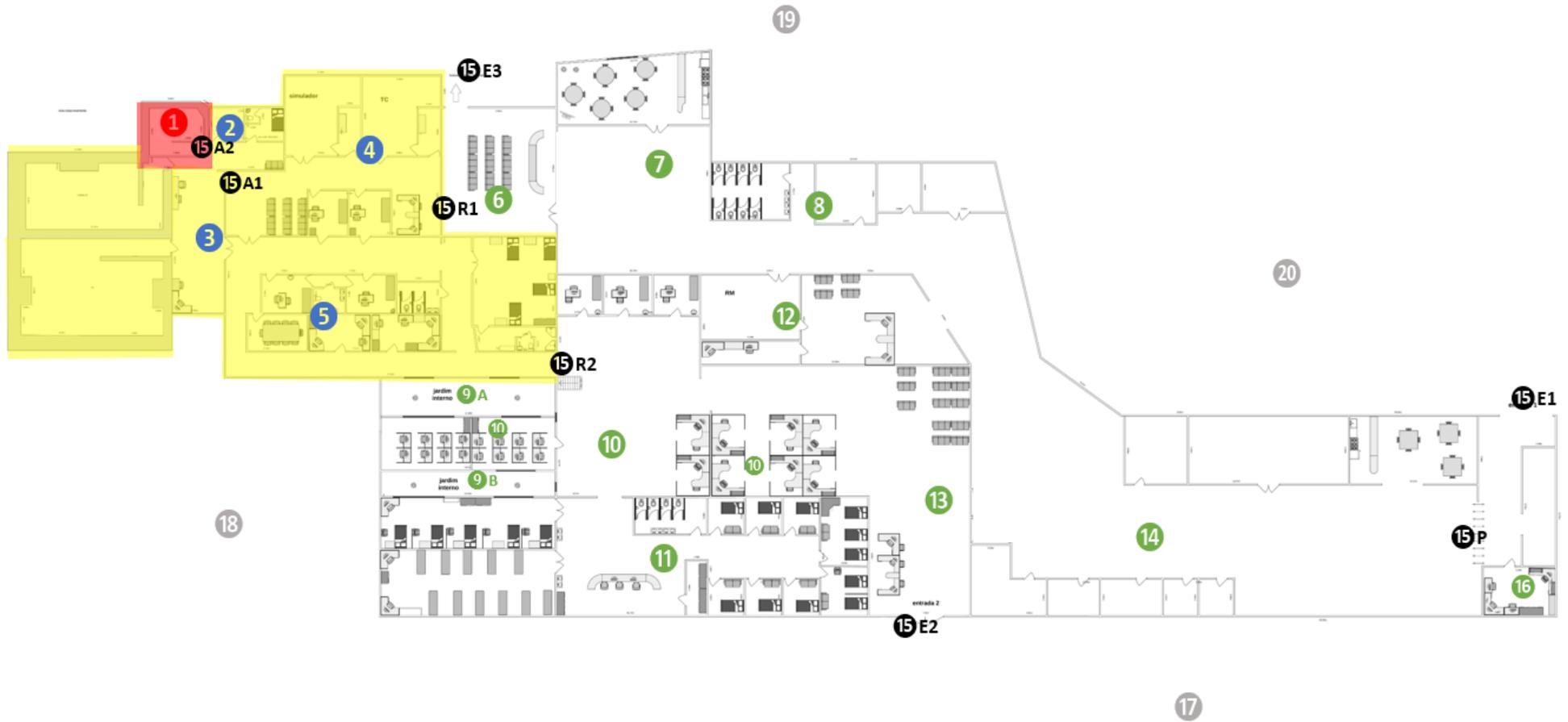


Tabela 4 Áreas física da instalação e suas classificações

ID	ÁREA	Controle de acesso	CLASSIFICAÇÃO
1	Sala de procedimentos Braquiterapia	Crachá com senha eletrônica, porta com tranca,	Controlada
2	Sala de comando Braquiterapia	Crachá com senha eletrônica	Supervisionada
3	Serviço de radioterapia	Crachá com senha eletrônica/ presença de recepcionista	Supervisionada
4	Simulador e sala de tomografia	Crachá com senha eletrônica/ presença de recepcionista	Supervisionada
5	Consultórios médicos, sala de planejamento	Liberação recepção local / acesso com crachá ou senha própria	Supervisionada
6	Sala de espera de pacientes	Liberação recepção local/Crachá com senha eletrônica	Vigiada
7	Hall de acesso	Liberação recepção, Crachá com senha eletrônica	Vigiada
8	Área técnica	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
9A e 9B	Jardim interno	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
10	Acesso ao serviço de tecnologia da informação	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
11	Serviço de quimioterapia	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
12	Serviço de ressonância magnética	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
13	Entrada de acesso de pacientes ao setor de quimioterapia/ funcionários	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
14	Hall de entrada	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
15E1,15E2 e 15E3	Acessos ou entradas	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
15P	Acesso de catracas principal	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
15R1	Acesso ao setor de Radioterapia	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada

15R2	Acesso ao setor de Radioterapia	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
15A1	Acesso ao comando braquiterapia	Crachá com senha eletrônica	Supervisionada
15A2	Acesso a sala de braquiterapia	Crachá com senha eletrônica	Controlada
16	Central de segurança	Liberação segurança / Crachá com senha eletrônica	Vigiada
17	Área externa	Circulação livre para pessoas/veículos são liberados por segurança	Livre
18	Área aterrada	NA	NA
19	Área externa	Circulação livre para pessoas/veículos são liberados por segurança	Livre
20	Área externa	Circulação de pessoas e veículos de descarga de materiais / veículos são liberados por segurança	Livre
Obs.: A área externa da instalação é circundada por muros de concreto para delimitação de perímetro e segurança			

## 5.2 Descrição do sistema de vigilância e controle de acesso

Em acordo com a norma CNEN 2.06, o sistema de segurança deve prever os seguintes requisitos:

I) O serviço de vigilância opera 24h por dia, sete dias por semana, com canal direto de comunicação com os responsáveis pelo Serviço Proteção Física.

II) As vigilâncias são realizadas por câmeras e por patrulhamento periódico a fim de verificar a integridade física dos elementos de proteção e detectar tentativas de violação.

III) O sistema de vigilância é suplementado pelos membros do SPF durante o período das práticas e fora destas.

IV) O patrulhamento é realizado durante o período de operação do serviço de radioterapia, na abertura e fechamento e de 6 em 6 horas fora do período de operação (das 22h às 06h nos dias úteis e nas 24h de finais de semana e feriados).

V) Os itens verificados durante patrulhamento são:

- integridade de portas de acesso e seus mecanismos de acesso;
- integridade e posicionamento das câmeras de segurança;
- integridade dos sensores de intrusão;
- integridade da unidade de tratamento;

- integridade do armário que abriga os baldes.

VI) Os registros dessas ações encontram-se fixados em local visível no corredor de acesso à sala onde estão localizadas as fontes.

A equipe de segurança patrimonial é dimensionada de acordo com o fluxo de pessoas circulantes na instalação em uma escala de 1:50, atuando com aproximadamente 200 funcionários em revezamento durante o dia. Esse dimensionamento também leva em conta as características da instalação, o número de pontos de acesso, número de funcionários e área a ser protegida (SILBAR SECURITY, 2020).

O acesso de veículos à instalação é permitido por pré-cadastrado de funcionários do hospital junto ao serviço de Segurança Patrimonial. Este cadastro pode ser feito ao adentrar a instalação e contém:

- Nome do motorista;
- CPF;
- Documento do veículo;
- Área de destino;
- Setor ou responsável pelo acesso.

O acesso de visitantes é realizado na Central de Segurança do hospital, mediante cadastro, contendo:

- Foto do ingressante;
- Dados do documento de identificação: (Nome, ID, CPF)
- Data e hora da visita;
- Motivo da visita;
- Responsável pela liberação do acesso;

O visitante deve portar, em local visível, a identificação impressa na Central de Segurança, enquanto estiver nas áreas vigiadas da instalação.

A entrada e saída de equipamentos são controladas através de uma Guia de Controle de Entrada e Saída de Equipamentos que é encaminhada por comunicação interna para o departamento da Central de Segurança. Este documento deve conter a descrição do equipamento, origem ou destino e a confirmação do responsável do departamento. As guias e comunicações deverão ser apresentadas e arquivadas na Central de Segurança.

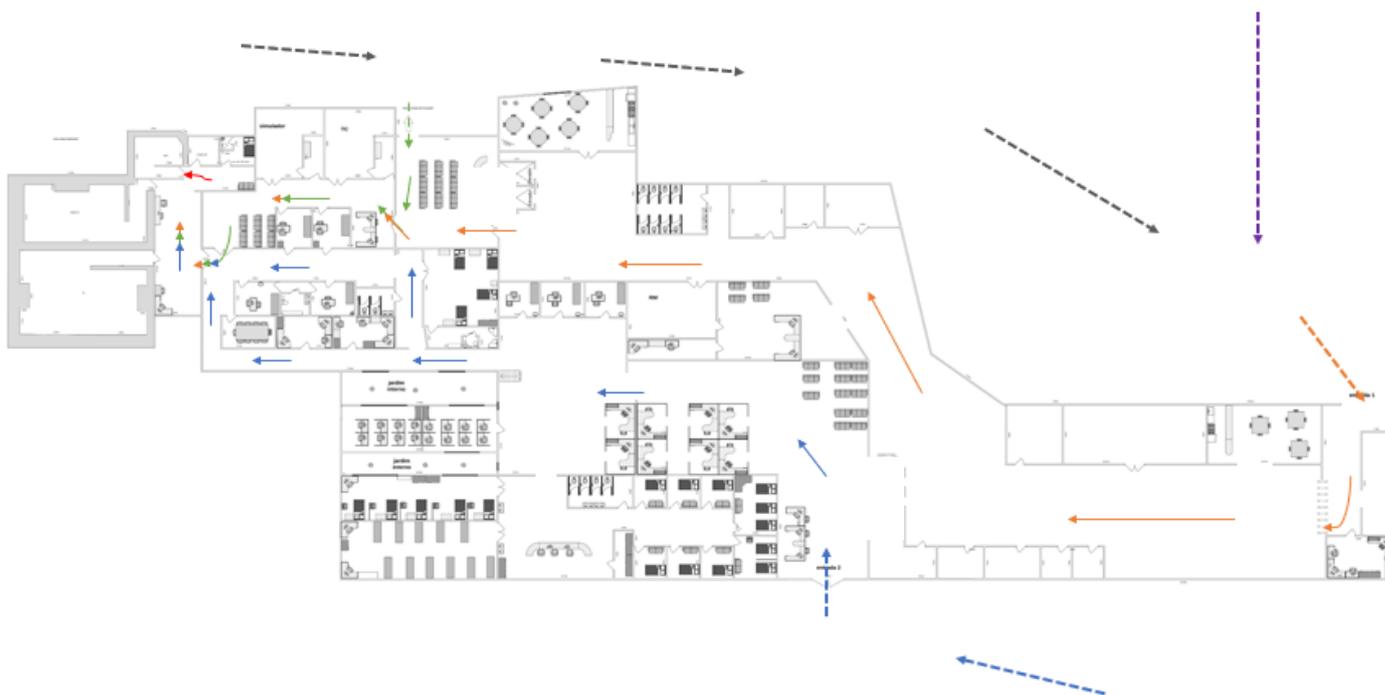
A entrada e saída das fontes radioativas é realizada sempre com agendamento prévio junto a equipe de segurança patrimonial e dos supervisores de proteção radiológica

(SPRs) (também membros da EPF). Os veículos que conduzirão as fontes, são previamente cadastrados na central de segurança bem como os dados de identificação do motorista/funcionário que realizará a entrega e/ou retirada das fontes. Este cadastro é verificado pelo SPR junto a empresa de transporte. A operação é realizada em horário comercial, onde o veículo é estacionado próximo à entrada de descarga de materiais, indicação 20 da tabela 4, correspondente à figura 17. Sua entrada/saída da instalação é realizada pela entrada 15P e é acompanhada pelo SPR até seu local de armazenamento (sala de braquiterapia).

### **5.3 Descrição dos acessos possíveis até a fonte radioativa**

De maneira a definir os itens necessários para defesa em profundidade da fonte radioativa, as áreas e acessos disponíveis da instalação foram rastreados. Estes acessos estão indicados na figura 18:

Figura 18 Indicação dos diferentes acessos à fonte radioativa



A identificação das cores das setas (azul, verde e laranja, vermelho e preto) indicam os acessos por diferentes rotas internas da instalação que levam à fonte radioativa. As linhas tracejadas indicam os meios de acesso externos. As principais entradas do prédio são controladas por catracas, e para funcionários do hospital os acessos são feitos com senha específica e apresentação de crachá.

As áreas do serviço de radioterapia, de acordo com a planta da figura 18, podem ser acessadas de três maneiras: pela entrada principal de funcionários e visitantes (indicação laranja) pelo acesso lateral para funcionários (indicados em verde) e pelo acesso para pacientes e funcionários (indicado em azul).

O dimensionamento dos caminhos de entrada da instalação até a fonte radioativa (baldes e equipamento) é apresentado na tabela 5:

Tabela 5 Distância percorrida da entrada do hospital até alvos de roubo

Caminho até a fonte radioativa	Distância total (m)
Laranja	202
azul (ambos)	153
Verde	113

O serviço de radioterapia conta com uma sala de espera para pacientes e acompanhantes em espera para os procedimentos de braquiterapia, teleterapia e simulação de tratamento. As áreas de segurança supervisionadas e controladas possuem restrições de acesso, são monitoradas com câmeras e possuem sistema de placas indicadores de área sob vigilância.

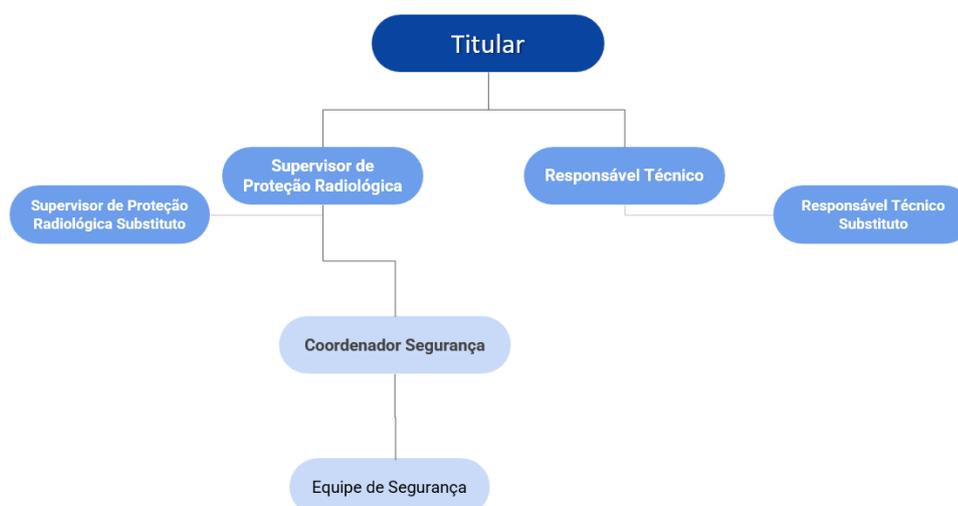
A sala de procedimentos de braquiterapia está localizada dentro do serviço de radioterapia, ao final à esquerda de um corredor de acesso a esta sala. Este corredor é delimitado por uma porta de vidro de acesso com senha. Sua localização é circunvizinha de uma área aterrada (que não pode ser acessada) da sala de comando da braquiterapia (acessada somente por pessoas autorizadas) e de uma sala que contém um acelerador linear, acessadas por IOEs e pelos pacientes em tratamento.

## 5.4 Descrição da equipe de proteção física (EPF)

### 5.4.1 Organograma da equipe de proteção física

A equipe de proteção física (EPF) do serviço de radioterapia é composta pelos, responsáveis legais, Titular, Responsáveis Técnicos e Supervisores de Proteção Radiológica, acrescidos pela equipe do serviço de Segurança Patrimonial. O organograma do serviço de proteção física é apresentado na Figura 19.

Figura 19 Organograma da equipe de proteção física



O organograma supracitado foi estabelecido de acordo com a normativa CNEN 2.06 e deve contar com um supervisor de proteção radiológica, seu substituto e equipe de proteção física com treinamento específico. Além da equipe direta de proteção física,

indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs) cujas práticas são ligadas ao uso da fonte radioativa também recebem treinamento e orientações de proteção física.

#### **5.4.2 Responsabilidades da equipe de PF e IOEs**

Os funcionários da instalação, cuja função está diretamente ligada às fontes de radiação ou a sua segurança física, seja de maneira a atuar na sua proteção ou a gerenciar os processos para que isto aconteça tem as seguintes responsabilidades estão:

- I. executar suas atividades em conformidade com os requisitos dos documentos de proteção física estabelecidos pelo SPF;
- II. conhecer e aplicar as medidas de proteção física conforme as instruções e orientações do SPR;
- III. participar dos programas de treinamento oferecidos pelo SPF;
- IV. informar ao SPR qualquer comportamento suspeito ou inadequado que possa representar um risco à proteção física da fonte radioativa;
- V. informar ao SPR qualquer evento anormal na instalação, que possa representar um risco à proteção física da fonte radioativa; e
- VI. atuar em situações de contingência, de acordo com o previsto no PPF, avaliando e implementando medidas específicas aplicáveis.

Os critérios de recrutamento e seleção consideram triagem de currículo, prova escrita, análise curricular, avaliação psicológica, entrevista técnica, comprovação de experiência e/ou habilitação técnica-operacional. A avaliação psicológica é a etapa da seleção que consistirá em entrevista e aplicação de testes comportamentais, conduzidas pela área responsável pela seleção, por meio de seu quadro de psicólogos.

#### **5.4.3 Programa de treinamento e reciclagem periódica**

No âmbito de proteção física, os treinamentos para IOEs são realizados a cada 2 anos, conforme a norma 2.06, 2019 contemplando assuntos, práticas e procedimentos adequados ao efetivo desempenho de suas funções, incluindo os seguintes tópicos, sugeridos na mesma normativa:

- I. Finalidades e princípios de proteção física;
- II. Operação e teste dos sistemas e dos dispositivos de segurança utilizados;
- III. Responsabilidades;
- IV. Ameaças à proteção física de fontes radioativas;
- V. Regras, procedimentos e diretrizes da organização;

- VI. Controles de acesso às áreas de segurança;
- VII. Situações de contingência e ações a serem tomadas para respondê-las; e
- VIII. Comunicações de segurança;

A equipe de proteção física recebe treinamento e reciclagem periódicos, a cada 2 anos (CNEN, 2.06) sobre assuntos, práticas e procedimentos adequados ao desempenho de suas funções incluindo, entre outros, os seguintes tópicos:

- I - Todo conteúdo contemplado no treinamento e reciclagem de IOE;
- II - Autoridade e responsabilidade individual como parte da equipe de proteção física;
- III - Controle de tráfego;
- IV - Métodos de busca e apreensão;
- V - Redação de relatórios;
- VI - Primeiros socorros;
- VII - Orientação básica sobre proteção radiológica;
- VIII - Noções de segurança técnica da instalação;
- IX - Controles de acesso;
- X - Prevenção e combate a incêndio;
- XI - Técnicas de defesa pessoal; e
- XII - Conhecimento de armas, quando aplicável.

Os funcionários já integrantes do quadro são avaliados de 12 em 12 meses utilizando o método que considera as competências, habilidades e atitudes dos colaboradores. Esta avaliação é realizada pelas lideranças do setor e são arquivadas no prontuário de cada colaborador, servindo como ferramenta para melhoria e adequação dos processos.

#### **5.4.4 Conscientização dos profissionais**

Todos os profissionais que trabalham no serviço de radioterapia têm conhecimento da importância e da correta execução de suas atividades, bem como de suas responsabilidades acerca da utilização dos materiais radioativos presentes no setor. Também tem consciência dos riscos associados às práticas utilizando material radioativo e do impacto que uma remoção ou extravio deste tipo de material pode causar às pessoas e/ou ao meio ambiente. Para tanto, recebem orientações da equipe de proteção física sobre procedimentos em operações normais ou de emergência, devendo sempre informar os responsáveis sobre anormalidades da rotina que caracterizam ameaças e/ou comportamentos suspeitos de qualquer indivíduo presente no setor, inclusive outros funcionários da instalação.

## **5.5 Descrição dos elementos do sistema de proteção física**

Os elementos necessários para estabelecer um sistema de proteção física são descritos a seguir, de acordo com normativa 2.06 CNEN, 2019 e IAEA, 2014:

### **5.5.1 Dissuasão**

Os elementos de dissuasão têm por objetivo induzir o adversário a mudar de ideia e desistir de realizar a remoção não autorizada. Os principais elementos de dissuasão da instalação são:

- Patrulhamento: presença dos integrantes da segurança
- Componentes visíveis: câmeras e placas de sinalização

Mesmo com a presença deste mecanismo, estima-se que a probabilidade de que um adversário realize o ataque é uma medida difícil de prever, uma vez que é baseada no comportamento humano. Por este motivo, as estimativas de risco consideram que o adversário sempre irá realizar o ato maléfico mesmo na presença de dissuasão (NSSEP, 2021).

### **5.5.2 Detecção**

Os principais elementos de detecção da instalação, e seu respectivo objetivo, são:

- Patrulhamento - Objetivos: detectar imediatamente qualquer tentativa de remoção não autorizada da fonte radioativa
- Controle de saída de materiais - Objetivos: detectar imediatamente qualquer tentativa de remoção não autorizada da fonte radioativa
- Câmeras de vigilância - Objetivos: detectar imediatamente qualquer tentativa de remoção não autorizada da fonte radioativa
- Monitoramento das câmeras de vigilância - Objetivos: avaliar imediatamente a detecção e comunicar imediatamente o pessoal de resposta.

#### **5.5.2.1 Estimativa das probabilidades de detecção**

De acordo com os dados fornecidos pela IAEA, cujas probabilidades foram estimadas com base em SNL, 2015, as probabilidades de detecção dos elementos do sistema de proteção física descritos na figura 17 e tabela 4 que serão considerados na sequência do adversário até a fonte radioativa são os seguintes:

*Tabela 6 Estimativa das probabilidades de detecção dos elementos do SisPF*

ID	Local	Tipo de verificação	P <sub>D</sub>
15E1, E2 e E3	Acessos/ entradas principais	Liberação segurança	0,02
		Crachá com senha	0,6
		Utilizar força contra segurança	0,5
15R1	Acesso ao setor de Radioterapia	Liberação recepção local	0,1
		Crachá com senha	0,6
15R2	Acesso ao setor de Radioterapia	Liberação recepção local	0,1
		Crachá com senha	0,6
10	Acesso ao serviço de tecnologia da informação	Crachá com senha	0,6
3	Serviço de radioterapia	Liberação recepção local	0,1
		Crachá com senha	0,6
2	Sala de comando Braquiterapia	Crachá com senha	0,6
1	Sala de procedimentos Braquiterapia	Crachá com senha	0,6

### 5.5.3 Retardo

Os elementos de retardo têm o objetivo de reduzir a possibilidade de remoção não autorizada dos alvos (fontes radioativas), proporcionando tempo adicional e oportunidade para detecção e resposta. Os principais elementos de retardo da instalação são:

- Barreiras físicas: catracas, cadeados e travas;
- Barreiras de reação: guardas.

#### 5.5.3.1 Estimativa dos tempos de retardo dos elementos de proteção física

Os tempos de retardo dos elementos de proteção física presentes na sequência do adversário até a fonte radioativa estão representados na tabela 6. Os valores associados a cada tipo de acesso foram baseados em medidas realizadas na instalação e nas referências de GARCIA (2008) e SNL (2015).

Tabela 7 Estimativa dos tempos de retardo dos elementos do SisPF

Elemento de retardo	Tipo de acesso	T <sub>R</sub> (s)
Porta com blindagem na sala de braquiterapia	Arrombar trava da porta	60
	Arrombar porta	30
Porta de vidro de acesso ao comando da sala de braquiterapia	Abrir buraco em vidro	30
	Arrombar quebrando vidro da porta	20
Porta de acesso radioterapia	Arrombar porta	30
Trava unidade de braquiterapia	Cortar cabo de aço	20
Armário contendo fontes	Arrombar armário	15
Balde com fonte radioativa	Retirar cápsula com fonte do balde	20
Muros	Pular sobre o muro	15

#### 5.5.4 Resposta

Os elementos de resposta servem para iniciar imediatamente a resposta às ameaças com intenção de interromper a remoção não autorizada dos alvos (fontes radioativas). Os principais elementos de resposta da instalação são:

- Comunicação - Objetivo: informar os responsáveis sobre uma possível ameaça às fontes ou barreiras. Ela pode ser verbal ou por telefone.
- Interrupção - Objetivo: impedir que uma ameaça seja concretizada. Realizada por ações da segurança do hospital.
- Neutralização - Objetivo: recuperar fontes radioativas restabelecendo seu controle. Realizada por ações de segurança do hospital ou de defesa civil.

Na figura 20A e 20B estão representados em planta baixa, os dispositivos de detecção, dissuasão e retardo presentes no setor de radioterapia, bem como sua localização.

Figura 20 A Localização dos mecanismos de detecção, dissuasão e retardo presentes na instalação



Figura 20B - Localização dos mecanismos de detecção, dissuasão, retardo presentes no serviço de radioterapia (ampliada da instalação)

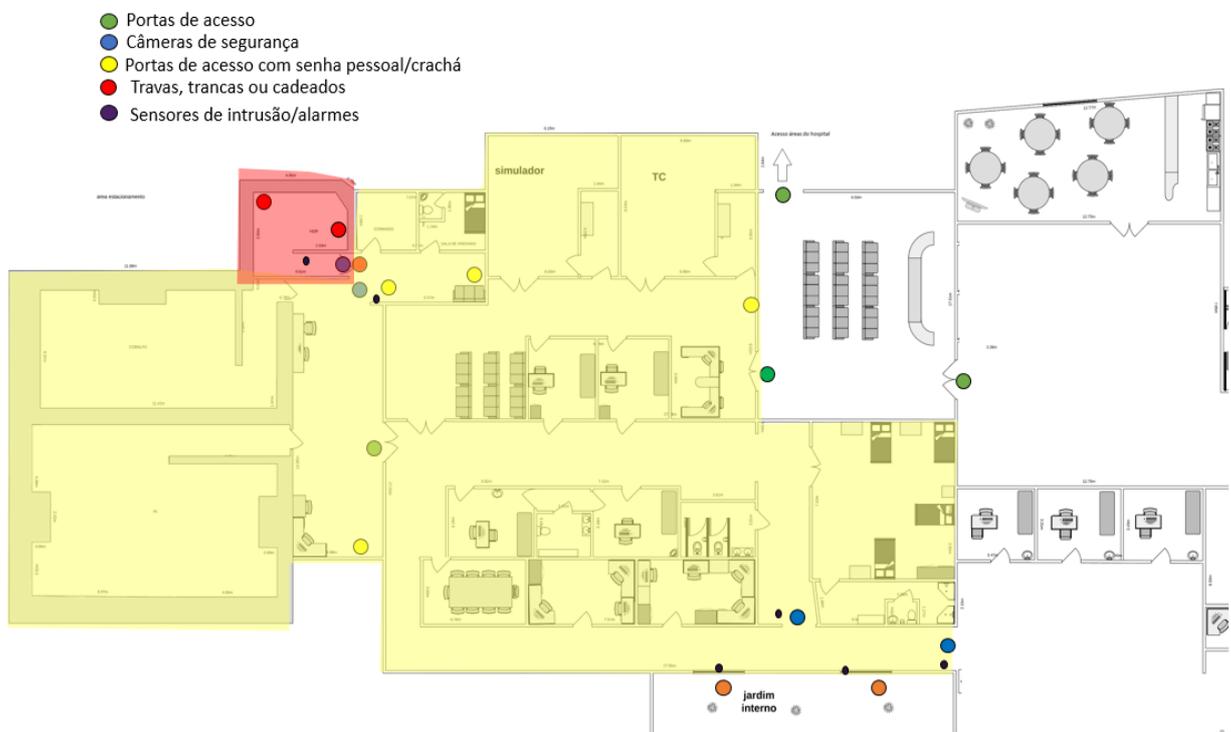
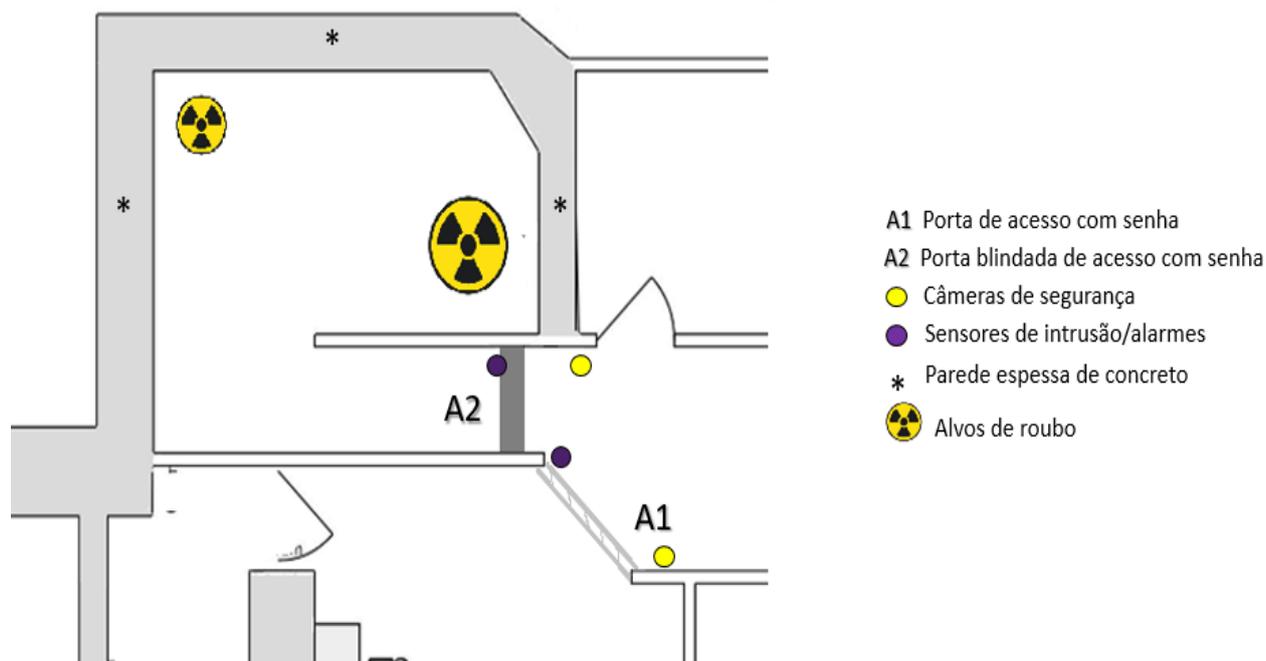


Figura 20C - Localização dos mecanismos de detecção dissuasão, retardo presentes nas imediações à sala que contém a fonte (ampliada do serviço de radioterapia)



Nos principais acessos ao serviço de radioterapia existem placas de dissuasão identificando as áreas sob vigilância (indicado em amarelo). A entrada das áreas de segurança controladas dispõe de câmeras de vídeo devidamente sinalizadas com transmissão ao vivo para a central de segurança, que são gravadas em arquivo por 60 dias. Seu sistema de visualização para fins de monitoramento da área conta com um operador 24h por dia, todos os dias da semana.

Os sensores de intrusão são ligados ao sistema de alarme e seu disparo aciona imediatamente a central de segurança que realiza a avaliação de sua procedência. Se o alarme for disparado e algum tipo de falha no sistema de vigilância por câmeras ocorrer, um integrante do serviço de segurança é enviado ao local de ocorrência do alarme para sua avaliação. Os sensores/alarmes e câmeras de vigilância possuem baterias internas que são acionadas em caso de corte ou falha da energia elétrica.

A iluminação da sala que contém as fontes e seu corredor de acesso é artificial, feita de maneira uniforme com um mínimo de 15 lux para que se possa realizar uma avaliação apropriada pelo sistema de câmeras de vigilância (SNL, 2015).

Para ter acesso ao corredor da sala de procedimentos de braquiterapia é necessária a colocação de senha pessoal na porta de acesso (indicado em verde). Somente integrantes da equipe de proteção física e IOEs cuja prática esteja diretamente ligada às

fontes de radiação tem esta senha cadastrada. Os registros de entrada ficam arquivados na central de segurança.

A sala de procedimentos possui trancamento com chave, permanecendo aberta durante a operação normal do serviço e trancada quando fora de sua operação. As chaves ficam no serviço enquanto está em operação cotidiana e, quando fora da operação, sob posse da central de segurança. As fontes exauridas ficam nesta mesma sala de procedimentos, alocadas em baldes dentro de armários trancadas com chave, que ficam em posse do supervisor de proteção radiológica.

#### **5.5.4.1 Estimativa do desempenho das forças de resposta**

Alguns dos parâmetros relacionados ao desempenho dos mecanismos das forças de resposta foram baseados em medidas realizadas na instalação e valores utilizados em dados tabelados por GARCIA (2008) e SNL (2015) e estão representados na tabela 7.

O tempo de chegada da força de resposta considerou o caminho mais curto até a fonte radioativa tendo como ponto de partida o serviço de segurança. Para o tempo estimado para a chegada da equipe das forças de resposta foi considerado o caminho percorrido por indivíduos jovens, do sexo masculino e que conheciam o caminho que deveriam percorrer até o local de armazenamento das fontes. Foram realizadas simulações de chamada às forças de segurança e o tempo de resposta, para atendimento de chamada, troca de informações e chegada até a fonte radioativa. Em caso de disparo de alarmes, o tempo total da força de resposta foi medido desde o seu disparo, com subsequente avaliação até a chegada da equipe de guardas até a fonte radioativa.

Tabela 8 Estimativa do desempenho das forças de resposta

<b>Parâmetro avaliado</b>	<b>Tempo (s)</b>
Abrir a blindada porta com senha	7
Abrir a porta	2
Abrir a porta com senha	5
Ativar alarme	1
Avaliar alarme	30
Comunicar força de resposta	32
Preparação força resposta	40
Chegada da força de resposta	55
Tempo total	158

## 5.6 Procedimentos de contingência

As ações de contingência são guiadas pelas seguintes etapas:

- I. Identificação de uma ameaça ou ato maléfico: percepção de qualquer atentado ou tentativa contra o sistema de vigilância, controle de acesso e elementos de dissuasão, detecção e retardo (atitudes suspeitas também são consideradas ameaças).
- II. Após a identificação iniciam-se as ações de resposta com objetivo de restringir o acesso dos adversários aos locais da fonte, prevenir que atos maléficos sejam concluídos ou interromper atos maléficos iniciados. Se a ameaça for percebida por um IOE, a primeira ação é a comunicação imediata do evento ao responsável da equipe de PF: Supervisor de Proteção Radiológica (na sua ausência, seu substituto, ou ao responsável técnico ou substituto).
- III. O responsável da EPF irá avaliar a situação de ameaça, comunicando (ou convocando) o responsável pela Segurança Patrimonial, ou o Serviço de Segurança Patrimonial, se necessário.

- IV. Caso a ameaça seja percebida por algum membro do serviço de segurança, ele irá realizar a sua avaliação, tomando as atitudes necessárias;
- V. O Serviço de Segurança Patrimonial irá conduzir as ações para retardar as ameaças, trabalhar nas primeiras ações para recuperar o material radioativo e/ou mitigar suas consequências, no caso efetivo de remoção. Nos casos em que a equipe de PF não conseguir resolver a ameaça, a Defesa Civil será acionada.

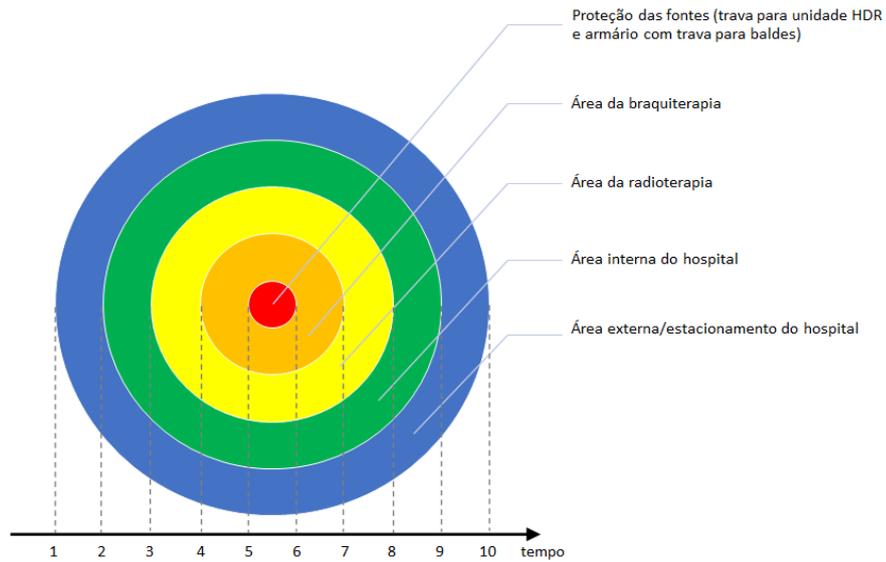
### **5.7 Segurança da Informação**

Os procedimentos descritos no plano de proteção física (PPF), a descrição dos elementos de proteção física, os registros de patrulhamento, certificados e inventário das fontes radioativas, os registros de treinamentos dos funcionários e todos os itens relacionados à PF da instalação, encontram-se no serviço de radioterapia, no serviço de proteção física (sala do SPR) em armário com chave de posse do SPR e seu substituto. Os registros físicos também têm duplicidade em mídia virtual protegida pela segurança de dados do hospital, em pasta própria em rede, com acesso restrito aos usuários cadastrados pela tecnologia da informação, permitindo somente acesso com *login* e senha própria. Este acesso é somente é permitido liberado aos integrantes da equipe de proteção física (EPF).

### **5.8 Análise das vulnerabilidades do SisPF**

A Figura 21 ilustra hipoteticamente as áreas da instalação divididas em camadas de segurança, de acordo com o conceito de defesa em profundidade, para auxiliar na identificação de cenários plausíveis e críveis nos quais um ou mais adversários possam realizar algum ato maléfico. Deste modo, para que um adversário possa concretizar um ato maléfico, ele precisa acessar a área que contém as fontes, ultrapassando as barreiras de 1 a 5, e removê-las do da instalação, ultrapassando as barreiras de 6 a 10.

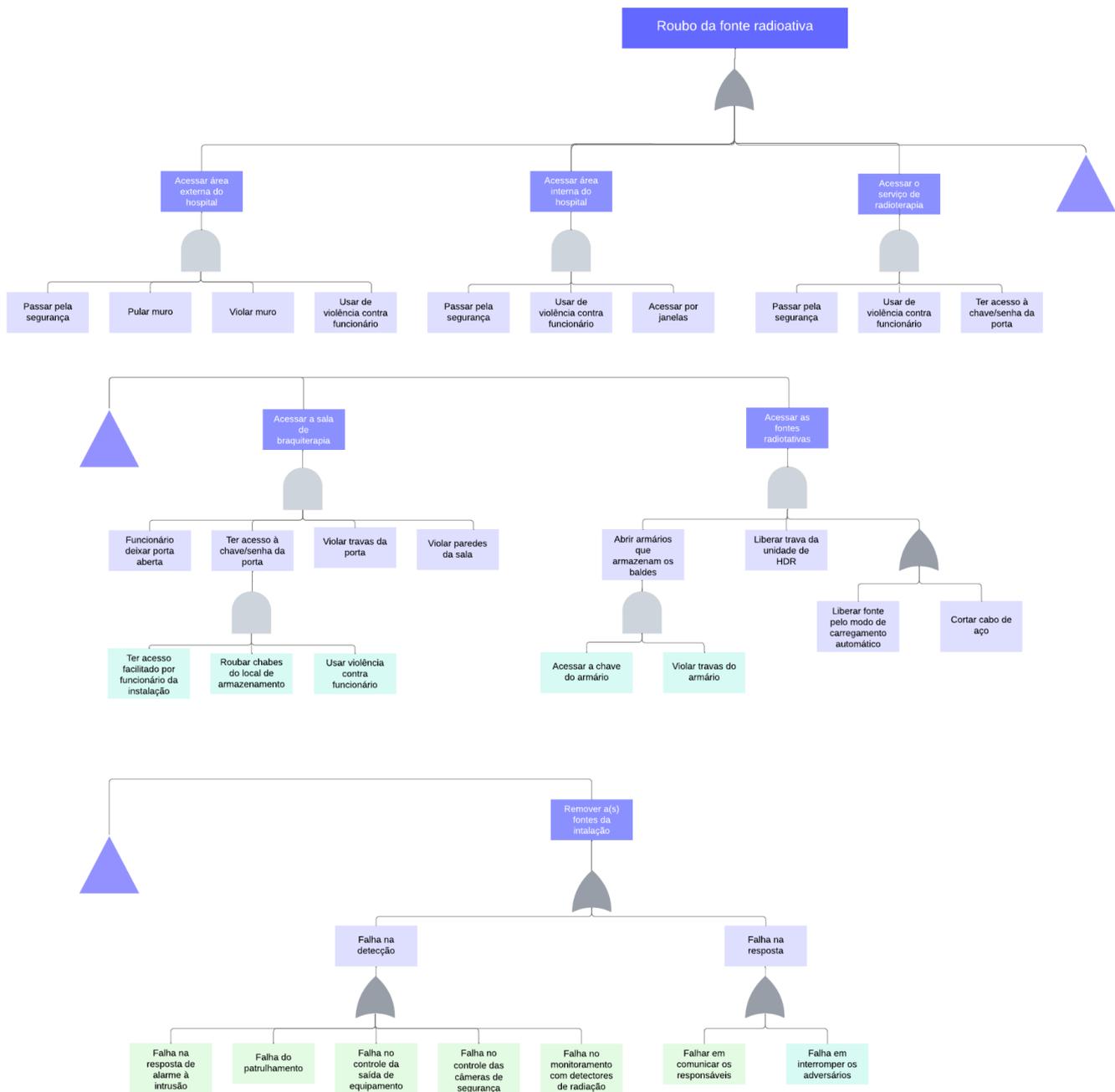
Figura 21 Camadas de segurança de um sistema de proteção física



Fonte: Elaborada por Radicchi, L.A.

Considerando os cenários de ameaça à instalação, e SisPF da instalação hipotética, delineou-se os possíveis cenários que em conjunto teriam como desfecho o suposto roubo da fonte radioativa, que é apresentado na figura 22, na aplicação da ferramenta de Análise de Árvore de Falhas.

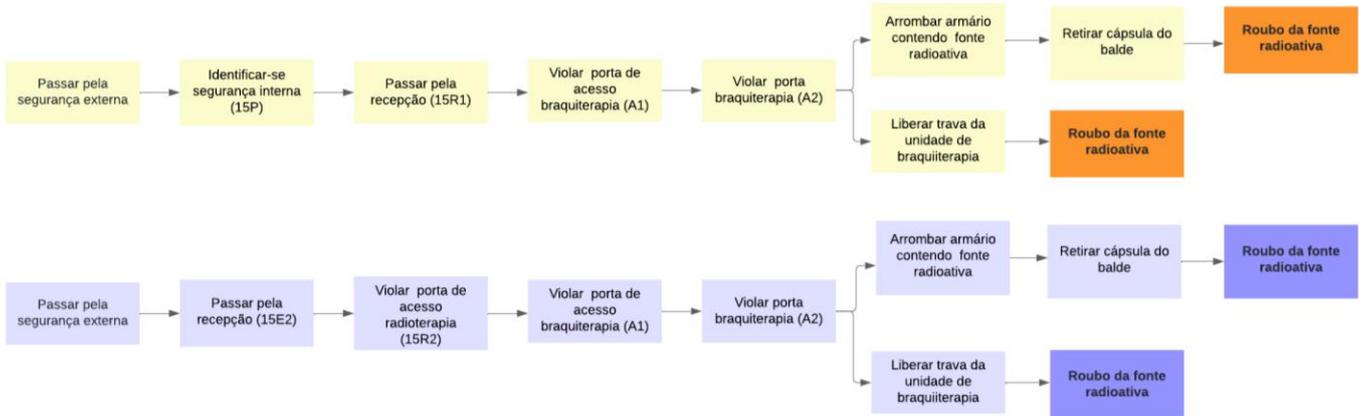
Figura 22 Análise de Árvore de Falhas: ramo com “topo arredondado e base achatada” = “E”, a saída ocorre se todas as entradas ocorrerem simultaneamente; ramo em “topo triangular e base curvada” = “OU”, a saída ocorre se uma ou mais entradas ocorrerem



## 6. RESULTADOS

A partir da descrição do projeto estrutural da instalação, apresentado no capítulo 6, e utilizando a análise da árvore de falhas da figura 22, possíveis sequências de eventos foram traçadas, considerando os adversários da a ameaça-base de projeto postulada. Esses sequenciamentos são apresentados nas figuras 23 e 24.

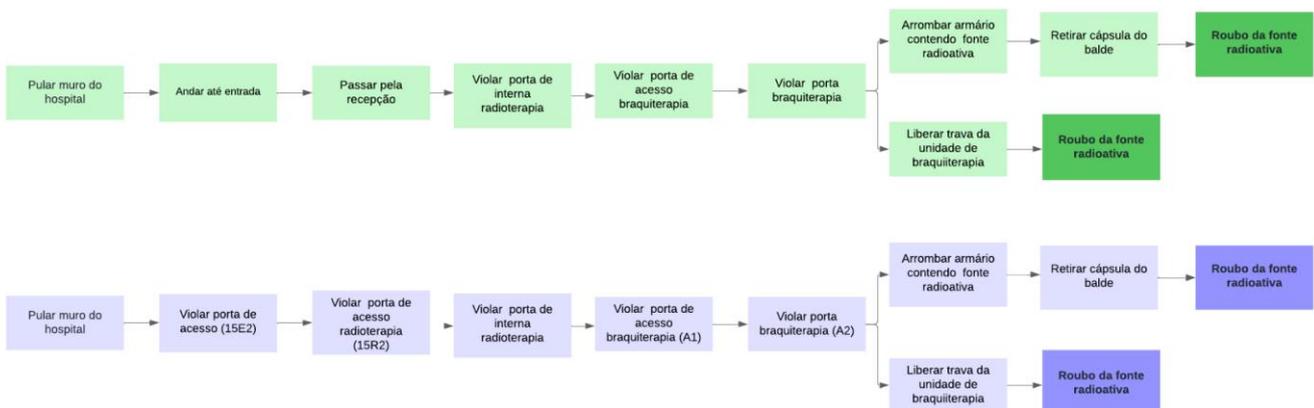
Figura 23 Sequência do adversário até a fonte radioativa ameaça 1: caminho em laranja e caminho em azul



Fonte: Elaborado pela autora

Considerando a ameaça 1, as rotas seguidas pelos adversários criminosos são descritas na figura 23. Em cada um dos caminhos traçados foi considerado o roubo da unidade de braquiterapia, contendo fonte em utilização e o roubo da cápsula blindada, contendo fonte exaurida. Para a ameaça supracitada a rota verde foi desconsiderada, uma vez que somente pode ser acessada por funcionários, tornando mais difícil a entrada do grupo de um grupo criminoso disfarçado.

Figura 24 Sequência do adversário até a fonte radioativa ameaça 2: caminho em verde e caminho em azul



Fonte: Elaborado pela autora

Considerando a ameaça 2, as rotas seguidas pelos adversários terroristas são descritas na figura 24. Para esta estimativa de ameaça a rota laranja foi desconsiderada, pois ela inicia com o adversário identificando-se na central de segurança, ou derrotando um grupo grande de guardas, tornando-se um caminho difícil do adversário atravessar sem ser percebido. Assim como na ameaça 1, para cada um dos caminhos traçados foi considerado o roubo da unidade de braquiterapia, contendo fonte em utilização e o roubo da cápsula blindada, contendo fonte exaurida.

Assim, utilizando os caminhos dos adversários e os elementos do SisPF da seção 5.5 foram determinados os PCD para cada sequência acima descrita. Com eles foram calculadas suas probabilidades de interrupção e, portanto, a eficácia global do sistema de proteção física ( $P_E$ ) pode ser determinada. De acordo com SNL, (2015) para que sistema de proteção física cumpra com sua proposta, sua eficácia ( $P_E$ ) deve ser de pelo menos 85%. A avaliação de  $P_E$  é essencial para que se verifique a adequação do projeto do SisPF frente às ameaças consideradas e se identifique suas vulnerabilidades, podendo-se assim realizar as melhorias necessárias para sua adequação. Esta avaliação também serve como uma ferramenta de avaliação periódica do SisPF (TAVARES, 2018).

### **6.1 Análise da probabilidade de interrupção $P_I$**

De acordo com os cenários de ameaça-base e com os caminhos de adversário postulados, a probabilidade de interrupção  $P_I$  foi determinada. Considerando que o tempo total da força de resposta ( $T_G$ ) foi estimado em 158s, para ambos os cenários de ameaça, utilizaremos a análise de interrupção em um caminho para determinar o ponto crítico de detecção (PCD), considerando as diferentes ameaças. Inicialmente os cenários consideram a remoção da unidade de braquiterapia:

Tabela 9 Determinação do PCD para caminho laranja, ameaça 1

Ameaça 1: caminho laranja					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, $P_D$	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Recepção veículos	Passar pela segurança interna	0,05	40	348
2	Portaria (15P)	Andar até portaria	0	32	316
3	Segurança	Passar pela segurança	0,05	60	256
4	Radioterapia	Andar até radioterapia	0	74	182
5	Recepção (15R1)	Passar pela recepção	0,1	50	132
6	Porta acesso comando	Andar até comando	0	17	115
7	Porta acesso ao comando (15B1)	Violar porta de acesso braquiterapia	0,9	30	85
8	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Correr até porta	0	1	84
9	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	60	24
10	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,8	4	20
11	Unidade de braquiterapia (A)	Cortar trava da unidade de braquiterapia = roubo fonte	0	20	0

PCD

O tempo restante indicado na tabela acima é o tempo para a concretização da ameaça (TCA), que considera o tempo total dos adversários assim que estes passam pelo primeiro ponto do caminho a ser percorrido: ponto de detecção 1. O valor do TCA se dá então pelo somatório de todos os  $T_R$  após penetrado o primeiro ponto de detecção da instalação. O valor de TCA, ou tempo restante do adversário no ponto de detecção 2 é calculado subtraindo-se o tempo de retardo do ponto de detecção 2 do TCA do ponto 1 e assim, sucessivamente de acordo com a equação abaixo:

$$TCA_N = TCA_{N-1} - T_{RN} \quad (\text{equação 4})$$

Onde N é o número do ponto de detecção.

A soma de todos os tempos restantes é igual ao tempo para a concretização para ameaça. O PCD é definido no local em que tempo restante é menor do que o tempo da força de chegada das forças de resposta, ou seja,  $TCA < T_G$ .

Assim, a partir dos dados da tabela 9, que considera o caminho 1, obtemos o PCD entre os pontos 4 e 5, entrada do serviço de radioterapia. Uma vez que o tempo de resposta  $T_G$  foi estimado em 158 segundos, e considerando as probabilidades de detecção ( $P_D$ ) apresentados na tabela 5, de acordo com a equação 1 a probabilidade de interrupção será:

$$P_i = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times (1 - P_{D3}) \times (1 - P_{D4})]$$

$$P_i = 1 - [(1 - 0,02) \times (1 - 0) \times (1 - 0,02) \times (1 - 0)]$$

$$P_i = 0,0396 = 4\%$$

Isto significa que para o sistema de segurança proposto, a probabilidade de interrupção nas condições descritas é de menor que 4%. Uma solução para aumentar a eficácia do

sistema seria reduzir o tempo das ações das forças de resposta, e/ou aumentar os tempos de retardo das barreiras até a fonte. Aumentar a probabilidade de detecção das barreiras iniciais não foi considerado factível neste cenário uma vez que o adversário iria entrar na instalação passando-se por outra pessoa que é autorizada a estar na instalação, como, por exemplo, um técnico de manutenção ou visitante.

Considerando diminuir o tempo da chegada da força de resposta para 80s, teremos o seguinte cenário:

Tabela 9.1: Determinação do PCD para a ameaça, caminho laranja, com  $T_G$  otimizado

Ameaça 1: caminho laranja					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, $P_D$	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Recepção veículos	Passar pela segurança interna	0,05	40	348
2	Portaria (15P)	Andar até portaria	0	32	316
3	Segurança	Passar pela segurança	0,05	60	256
4	Radioterapia	Andar até radioterapia	0	74	182
5	Recepção (15R1)	Passar pela recepção	0,1	50	132
6	Porta acesso comando	Andar até comando	0	17	115
7	Porta acesso ao comando (15B1)	Violar porta de acesso braquiterapia	0,9	30	85
8	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Correr até porta	0	1	84
9	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	60	24
10	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,8	4	20
11	Unidade de braquiterapia (A)	Cortar trava da unidade de braquiterapia = roubo fonte	0	20	0

Assim, o PCD foi adiado para o ponto de detecção 8. O tempo calculado para percorrer este caminho considerou os tempos de retardo de cada elemento do SisPF, já tabelados e que o adversário iria caminhando<sup>3</sup> até o ponto de detecção 7.

Dessa maneira,  $P_I$  pode ser novamente calculada como:

$$P_I = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times (1 - P_{D3}) \times (1 - P_{D4}) \times (1 - P_{D5}) \times (1 - P_{D6}) \times (1 - P_{D7}) \times (1 - P_{D8})]$$

$$P_I = 1 - [(1 - 0,05) \times (1 - 0) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0) \times (1 - 0,1) \times (1 - 0) \times (1 - 0,9) \times (1 - 0)]$$

$$P_I = 0,919 = 92\%$$

<sup>3</sup> O tempo estimado para os adversários se locomoverem caminhando de um ponto de detecção ao outro foram baseados em medidas reais de tempo que indivíduos jovens do sexo masculino levavam para percorrer os mesmos caminhos dentro de uma instalação conhecida. A partir destes valores a velocidade média foi calculada e então utilizada para estimar os tempos de acordo com o tamanho da trajetória percorrida.

A diminuição do tempo de chegada das forças de resposta considerou uma otimização nos tempos de comunicação e avaliação do sistema de detecção, aumentando a probabilidade de interrupção para um valor de 92%.

Para o caminho azul, ameaça 1, o tempo de resposta otimizado foi novamente considerado (80s), com um tempo total para o adversário percorrer o caminho estimado em 379 segundos:

Tabela 10 Determinação do PCD para, ameaça 1, caminho azul

Ameaça 1: caminho azul					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, $P_D$	Tempo de retardo, $T_R$ (s)	Tempo restante (s)
1	Recepção veículos	Passar pela recepção	0,05	40	379
2	Portaria (15P)	Andar até portaria	0	32	347
3	Recepção (15E2)	Identificar-se na recepção	0,05	50	297
4	Radioterapia	Andar até radioterapia	0	55	242
5	Recepção (15R1)	Passar pela recepção	0,1	50	192
6	Radioterapia	Violar porta de acesso radioterapia	0,5	60	132
6	Porta acesso comando	Andar até comando	0	17	115
7	Porta acesso ao comando (15B1)	Violar porta de acesso braquiterapia	0,9	30	85
8	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Correr até porta	0	1	84
9	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	60	24
10	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,8	4	20
11	Unidade de braquiterapia (A)	Cortar trava da unidade de braquiterapia = roubo fonte	0	20	0

A partir dos elementos do SisPF e os locais que o adversário deveria percorrer e/ou burlar, pelos dados da tabela 9, encontramos o PCD entre os pontos 8 e 9, na porta de acesso à sala de braquiterapia. Considerou-se o adversário caminhando até o ponto de detecção 7. A probabilidade de interrupção então foi calculada:

$$P_I = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times (1 - P_{D3}) \times (1 - P_{D4}) \times (1 - P_{D5}) \times (1 - P_{D6}) \times (1 - P_{D7}) \times (1 - P_{D8}) \times (1 - P_{D9})]$$

$$P_I = 1 - [(1 - 0,05) \times (1 - 0) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0) \times (1 - 0,1) \times (1 - 0,9) \times (1 - 0) \times (1 - 0,9) \times (1 - 0)]$$

$$P_I = 0,992 = 99\%$$

O valor de probabilidade de interrupção está em torno de 99% para este caminho, visto que nele são necessárias a violação de mais portas de acesso para que se chegue até a fonte radioativa.

Desta maneira, para a ameaça 1, o caminho crítico para acesso de roubo da fonte, em condições normais de operação foi determinado como o caminho laranja.

Para a ameaça 2, considerando o caminho azul e estimando que o tempo total para o adversário percorrer o caminho foi igual a 239 segundos, o PCD foi determinado:

Tabela 11 Determinação do PCD para caminho azul, ameaça 2

Ameaça 2: caminho azul					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, PD	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Muro externo	Pular muro	0,05	15	239
2	Entrada (15E2P)	Correr até entrada	0,05	30	209
3	Entrada (15E2)	Violar porta entrada	0,6	40	169
4	Radioterapia (15R2)	Correr até radioterapia	0,05	10	159
5	Radioterapia porta acesso (15R2)	Violar porta de acesso	0,5	30	129
6	Radioterapia acesso interno AL	Correr até porta interna	0,05	7	122
7	Radioterapia acesso interno AL	Violar porta interna	0,5	30	92
8	Radioterapia acesso comando A2	Correr até porta	0,05	4	88
9	Radioterapia porta acesso braquiterapia (A2)	Violar porta	0,8	30	58
10	Radioterapia comando	Correr até porta	0,02	1	57
11	Radioterapia porta braquiterapia A1	Violar porta	0,9	30	27
12	Porta acesso comando	Correr até comando	0,02	3	24
13	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,02	4	20
14	Unidade de braquiterapia (A)	Cortar trava da unidade de braquiterapia = roubo fonte	0	20	0

A partir dos dados da tabela 11, encontramos o PCD entre os pontos 8 e 9, no ponto de detecção, porta da radioterapia. Considerou-se o adversário caminharia até o ponto 7, e após isto, realizaria as atividades correndo<sup>4</sup> até o próximo ponto. Desta maneira a probabilidade de interrupção foi calculada por:

$$P_I = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times (1 - P_{D3}) \times (1 - P_{D4}) \times (1 - P_{D5}) \times (1 - P_{D6}) \times (1 - P_{D7}) \times (1 - P_{D8})]$$

$$P_I = 1 - [(1 - 0,02) \times (1 - 0,02) \times (1 - 0,6) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0,5) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0,5) \times (1 - 0,05)]$$

$$P_I = 0,918 = 92\%$$

Para a ameaça 2 considerando o caminho verde e que o tempo total para o adversário percorrer o caminho foi estimado em 197 segundos, o PCD foi determinado:

<sup>4</sup> Os valores de tempo utilizados quando um adversário corria de um ponto de detecção ao outro, foram retirados de dados tabelados de velocidade média de um indivíduo correndo, apresentados por GARCIA, 2008.

Tabela 12 Determinação do PCD para caminho verde, ameaça 2

Ameaça 2: caminho verde					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, PD	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Muro externo	Pular muro	0,05	15	197
2	Entrada (15E3)	Correr até entrada	0,05	10	187
3	Entrada (15E3)	Usar de <del>violência</del> contra segurança	0,7	30	157
4	Radioterapia (R1)	Correr até radioterapia	0,05	3	154
5	Radioterapia porta (R1)	Violar porta de acesso	0,5	30	124
6	Radioterapia porta interna	Correr até porta	0,02	6	118
<del>7</del>	<del>Radioterapia porta interna</del>	<del>Violar porta</del>	<del>0,5</del>	<del>30</del>	<del>88</del>
8	Porta acesso comando	Correr até comando	0,02	3	85
9	Porta acesso ao comando braquiterapia(A1)	Violar porta acesso	0,8	30	55
10	Porta acesso a sala braquiterapia(A2)	Correr até porta braquiterapia	0	1	54
11	Porta acesso a sala braquiterapia(A2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	30	24
12	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,02	4	20
13	Unidade de braquiterapia (A)	Cortar trava da unidade de braquiterapia = roubo fonte	0	20	0

A partir dos dados da tabela 12, encontramos o PCD entre os pontos 8 e 9, porta de acesso ao comando da braquiterapia. Considerou-se o adversário correndo desde o ponto de entrada, ao pular o muro. Para este caminho a probabilidade de interrupção foi calculada:

$$P_i = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times (1 - P_{D3}) \times (1 - P_{D4}) \times (1 - P_{D5}) \times (1 - P_{D6}) \times (1 - P_{D7}) \times (1 - P_{D8})]$$

$$P_i = 1 - [(1 - 0,02) \times (1 - 0,02) \times (1 - 0,5) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0,3) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0,5) \times (1 - 0,05)]$$

$$P_i = 0,856 = 85,6\%$$

Analisando as probabilidades de interrupção, os caminhos que encontram maiores deficiências em proteção são: ameaça criminosa percorrendo o “caminho laranja” e da ameaça de terrorista percorrendo o “caminho verde”, sendo este caminho considerado o mais crítico em termos de deficiências em proteção física.

Seu valor está acima do considerado razoável para uma eficácia global  $P_E$  efetiva, mas uma vez que a determinação de  $P_E$  ainda envolve a probabilidade de neutralização, melhorias podem ser adicionadas a este trajeto para que se aumente a eficácia de detecção e a probabilidade de interrupção. Uma alternativa seria reduzir o tempo de chegada das forças de resposta, adicionando um ponto extra de guarda em períodos em que o serviço esteja operando fora de funcionamento normal, ou ainda aumentar a robustez de uma das portas de acesso antes do ponto crítico de detecção. Considerando a última alternativa, temos o seguinte cenário para a interrupção do caminho verde otimizado:

$$P_i = 1 - [(1 - P_{D1}) \times (1 - P_{D2}) \times (1 - P_{D3}) \times (1 - P_{D4}) \times (1 - P_{D5}) \times (1 - P_{D6}) \times (1 - P_{D7}) \times (1 - P_{D8})]$$

$$P_I = 1 - [(1 - 0,02) \times (1 - 0,02) \times (1 - 0,7) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0,3) \times (1 - 0,05) \times (1 - 0,5) \times (1 - 0,05)]$$

$$P_I = 0,913 = 91,3\%$$

Com a adição de tempo de retardo antes do PCD, obteve-se uma melhora em  $P_I$  de 85% para 91%.

A determinação do PCD e da  $P_I$  também foram realizados levando em conta a remoção da cápsula blindada contendo a fonte radioativa exaurida, inserida no balde de transporte lacrado, cenário o qual, apresenta a menor detecção de roubo de material radioativo até a saída da instalação pelas dimensões e peso da cápsula. Este cenário é o mais passível de ocorrer durante as trocas ou chegada/retirada das fontes da instituição conforme a descrição de ameaça na seção 4.4.2.

A estimativa do PCD para roubo da cápsula contida no balde considerando ameaça 1, caminho laranja é apresentado na tabela 13:

Tabela 13 Determinação do PCD para caminho laranja, ameaça 1, roubo de fonte contida no balde

Ameaça 1: caminho laranja					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, PD	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante TCA(s)
1	Recepção veículos	Passar pela segurança interna	0,05	40	363
2	Portaria (15P)	Andar até portaria	0	32	331
3	Segurança	Passar pela segurança	0,05	60	271
4	Radioterapia	Andar até radioterapia	0	74	197
5	Recepção (15R1)	Passar pela recepção	0,1	50	147
6	Porta acesso comando	Andar até comando	0	17	130
7	Porta acesso ao comando (15B1)	Violar porta de acesso braquiterapia	0,9	30	100
8	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Correr até porta	0	1	99
9	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	60	39
10	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,8	4	35
11	Armário contendo balde	Arrombar armário	0,1	15	20
12	Cápsula contendo fonte radioativa	Remover cápsula do balde = roubo fonte	0	20	0

Utilizando o tempo de resposta otimizado (80s), e o tempo total para o adversário percorrer o caminho estimado em 363 segundos, obtemos o seguinte resultado da probabilidade de interrupção, considerando o PCD no ponto 8, porta da sala da braquiterapia, assim como o considerado para roubo do cofre, porém agora com um TCA restante de 99s. A probabilidade de interrupção utiliza os mesmos pontos de detecção com as mesmas probabilidades estimadas para roubo da unidade de tratamento portanto é:  $P_I = 92\%$

Para o caminho azul, a estimativa do PCD para roubo da cápsula contida no balde considerando ameaça 1, é apresentado na tabela 14:

Tabela 14 Determinação do PCD para caminho azul, ameaça 1, roubo de fonte contida no balde

Ameaça 1: caminho azul					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, PD	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Recepção veículos	Passar pela recepção	0,05	40	394
2	Portaria (15P)	Andar até portaria	0	32	362
3	Recepção (15E2)	Identificar-se na recepção	0,05	50	312
4	Radioterapia	Andar até radioterapia	0	55	257
5	Recepção (15R1)	Passar pela recepção	0,1	50	207
6	Radioterapia	Violar porta de acesso radioterapia	0,5	60	147
6	Porta acesso comando	Andar até comando	0	17	130
7	Porta acesso ao comando (15B1)	Violar porta de acesso braquiterapia	0,9	30	100
8	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Correr até porta	0	1	99
9	Porta acesso a sala braquiterapia(15B2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	60	39
10	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,8	4	35
11	Armário contendo balde	Arrombar armário	0,1	15	20
12	Cápsula contendo fonte radioativa	Remover cápsula do balde = roubo fonte	0	20	0

PCD

Utilizando o tempo de resposta otimizado (80s), e o tempo total para o adversário percorrer o caminho estimado em 394 segundos, com um PCD na porta de acesso à braquiterapia e um TCA restante de 99s. A probabilidade de interrupção utiliza os mesmos pontos de detecção com as mesmas probabilidades estimadas para roubo da unidade de tratamento portanto:  $P_1 = 99\%$

A estimativa do PCD para roubo da cápsula contida no balde considerando ameaça 2, caminho azul é apresentado na tabela 15:

Tabela 15 Determinação do PCD para caminho azul, ameaça 2, roubo de fonte contida no balde

Ameaça 2: caminho azul					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, PD	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Muro externo	Pular muro	0,02	15	254
2	Entrada (15E2P)	Correr até entrada	0,02	30	224
3	Entrada (15E2)	Violar porta entrada	0,6	40	184
4	Radioterapia (15R2)	Correr até radioterapia	0,05	10	174
5	Radioterapia porta acesso (15R2)	Violar porta de acesso	0,5	30	144
6	Radioterapia acesso interno AL	Correr até porta interna	0,05	7	137
7	Radioterapia acesso interno AL	Violar porta interna	0,5	30	107
8	Radioterapia acesso comando A2	Correr até porta	0,05	4	103
9	Radioterapia porta acesso braquiterapia (A2)	Violar porta	0,8	30	73
10	Radioterapia comando	Correr até porta	0,02	1	72
11	Radioterapia porta braquiterapia A1	Violar porta	0,9	30	42
12	Porta acesso comando	Correr até comando	0,02	3	39
13	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,02	4	35
14	Armário contendo balde	Arrombar armário	0,1	15	20
15	Cápsula contendo fonte radioativa	Remover cápsula do balde = roubo fonte	0	20	0

Utilizando o tempo de resposta otimizado (80s), e o tempo total para o adversário percorrer o caminho estimado em 254 segundos, com PCD localizado na porta de entrada da radioterapia. A probabilidade de interrupção utiliza os mesmos pontos de detecção com as mesmas probabilidades estimadas para roubo da unidade de tratamento portanto obtemos o seguinte valor:  $P_i = 92\%$

Por fim, a estimativa do PCD para roubo da cápsula contida no balde considerando ameaça 2, caminho verde já otimizado é apresentado na tabela 16:

Tabela 16 Determinação do PCD para caminho verde, ameaça 2, roubo de fonte contida no balde

Ameaça 2: caminho verde - alternativo					
Ponto de detecção	Local	Ação	Probabilidade de detecção, PD	Tempo de retardo, TR (s)	Tempo restante (s)
1	Muro externo	Pular muro	0,02	15	212
2	Entrada (15E3)	Correr até entrada	0,02	10	202
3	Entrada (15E3)	Usar de violência contra segurança	0,5	30	172
4	Radioterapia (R1)	Correr até radioterapia	0,05	3	169
5	Radioterapia porta (R1)	Violar porta de acesso	0,7	30	139
6	Radioterapia porta interna	Correr até porta	0,02	6	133
7	Radioterapia porta interna	Violar porta	0,5	30	103
8	Porta acesso comando aceleradores	Correr até comando	0,02	3	100
9	Porta acesso ao comando braquiterapia(A1)	Violar porta acesso	0,8	30	70
10	Porta acesso a sala braquiterapia(A2)	Correr até porta braquiterapia	0	1	69
11	Porta acesso a sala braquiterapia(A2)	Violar porta sala braquiterapia	0,9	30	39
12	Sala de braquiterapia	Correr até fonte	0,02	4	35
13	Armário contendo balde	Arrombar armário	0,1	15	20
14	Cápsula contendo fonte radioativa	Remover cápsula do balde = roubo fonte	0	20	0

Utilizando o tempo de resposta otimizado (80s), localizamos o PCD na porta de acesso ao comando dos aceleradores, considerando o tempo total para o adversário percorrer o caminho de 212 segundos. A probabilidade de interrupção utiliza os mesmos pontos de detecção com as mesmas probabilidades estimadas para roubo da unidade de tratamento portanto é:  $P_i = 91,3\%$ .

Observa-se que as diferenças entre os caminhos de roubo da unidade e roubo da capsula encontram-se apenas após o PCD, portanto a probabilidade de interrupção manteve-se a mesma para ambos os cenários. A tabela abaixo sumariza os resultados encontrados nos exercícios da determinação do PCD e cálculo de  $P_i$ .

Tabela 17 Determinação da localização dos PCD e resultados de  $P_i$ 

Ameaça	Caminho	PCD	$P_i$
1	Laranja	Porta acesso à sala braquiterapia	92%
1	Azul	Porta acesso à sala braquiterapia	99%
2	Azul	Porta acesso comando A2	92,0%
2	Verde	Porta acesso comando aceleradores	85%
2	verde-otimizado	Porta acesso comando aceleradores	91,3%

Mesmo com uma melhoria proposta para o caminho verde otimizado, este cenário de ameaça à fonte ainda é o mais vulnerável da instalação, portanto por fatores conservativos será o resultado utilizado na análise da eficácia global ( $P_E$ ) do SisPF.

## 6.2 Análise da probabilidade de neutralização e análise da eficácia do SisPF

A probabilidade de neutralização ( $P_N$ ) expressa a capacidade das forças de respostas combaterem as ações realizadas pelos adversários por forma de uma razão numérica. Neste trabalho foram utilizados dados de  $P_N$ , provenientes de materiais didáticos da SNL (2015) que supõe que as forças de resposta e os adversários têm as mesmas capacidades, ou seja, o mesmo nível de armamento e treinamento, a força mais numerosa, será a capaz de completar seu objetivo, seja ele a neutralização do adversário ou conclusão do ato maléfico.

No presente exercício foi considerado que os guardas externos da instalação possuem armamento do tipo armas portáteis, equivalentes aos dos adversários descritos na ABP. Portanto supõe-se que:

- Se as forças de resposta possuem menor capacidade que o adversário, a  $P_N = 0$ ;
- Se as forças de resposta possuem maior capacidade que o adversário, a  $P_N = 1$ ;
- Se as forças de resposta e os adversários possuem capacidade equivalentes, os dados são tabelados de acordo com o número de envolvidos nas partes da ação, de acordo com documento anexo (SNL, 2015). O número de adversários utilizado na análise foi de dois integrantes, sendo este o número máximo considerado na ameaça postulada (ameaça terrorista).

*Tabela 18 Determinação das probabilidades de neutralização ( $P_N$ ) e cálculo da probabilidade global de eficácia do sistema*

Número de integrantes das forças de resposta	$P_N$	$P_E = P_I * P_N$
8	1	0,92
7	0,99	0,91
6	0,96	0,88
5	0,89	0,82

Para que se atinja o valor de 85% de eficácia global do SisPF, a partir dos resultados calculados de  $P_E$ , um número mínimo de seis integrantes das forças de resposta seria

necessário contra o número de adversários postulados. Considerando os caminhos com probabilidade de neutralização de 92% a eficácia global  $P_E$  teria um valor de 88%.

## 7. CONCLUSÕES

A proteção física de fontes radioativas no Brasil, ainda é um tema pouco explorado, principalmente considerando as fontes aplicadas às práticas clínicas. Visto o cenário atual mundial, noticiando interesse em materiais radioativos por grupos mal-intencionados, a adequação da proteção das fontes radioativas e das atividades relacionadas a seu uso se torna indispensável e desafiadora. A falta de publicações ou materiais nacionais na área hospitalar sobre este tema torna esta pesquisa um dos pontos norteadores para a elaboração de sistemas de proteção física para fontes e instalações radioativas associadas e a adequação e aplicação da normativa nacional CNEN 2.06.

A utilização da metodologia DEPO auxiliou na estruturação o projeto de um sistema de proteção física de uma instalação hipotética, delineando as áreas que segurança, os elementos de proteção física necessários para proteção adequada da fonte e os fluxos de adversários possíveis, avaliando se os elementos e ações que eles continham permitia que o sistema de segurança cumprisse sua eficácia. Para a instalação radioativa hipotética, visto as ameaças postuladas, foi possível atingir os objetivos do sistema de proteção física, porém aspectos importantes devem ser considerados, que refletem a dificuldade de estimar alguns recursos necessários para a pesquisa:

- Os valores utilizados para probabilidade de detecção e tempos de retardo em sua maioria são valores tabelados ou difíceis de estimar, sendo de interesse uma verificação que leve em consideração características reais de cada instalação;
- A ameaça base de projeto considerada é uma hipótese provável, porém uma estimativa real dos cenários de ameaças brasileiros é necessária;
- Para que as probabilidades de neutralização fossem alcançáveis, as capacidades dos guardas e grupo adversário foram consideradas equivalentes, ou seja, o tipo de armamento utilizado por ambas as forças deveria ter características similares.
- Outros aspectos acerca de  $P_N$ , como por exemplo, o nível de conhecimento sobre a instalação e seus elementos de PF, o tipo de veículo de fuga utilizado, reforços externos ou internos para as ações maléficas necessitam ser considerados, porém são de difícil estimativa.

No início do exercício de avaliação da eficácia do SisPF, uma reestruturação do sistema de proteção foi realizada, uma vez que o tempo considerado para as forças de

resposta agirem assim que detectada a ameaça levava a uma probabilidade de interrupção baixa, o que resultaria também em uma baixa eficácia global. Essa reestruturação implicou em considerar mudanças na comunicação inicial do elemento de resposta, pretendendo-se uma diminuição no tempo de avaliação do alarme, nos tempos de comunicação entres forças de resposta, bem como na diminuição do tempo de preparação da equipe de guarda. Não sendo possível a redução de algum destes tempos, uma alternativa seria que existisse um posto de guarda mais próximo à área que se localizam os alvos.

Na presente pesquisa a determinação do ponto crítico de detecção e avaliação da eficácia do sistema de proteção física, mesmo que não exigido na normativa 2.06, se mostra um exercício necessário para a adequação de novas instalações visto identificar as deficiências, falhas de processos e ressaltar pontos de otimização buscando adequar os elementos de proteção física às realidades de cada instalação. Isto pode resultar em maiores investimentos no projeto ou mesmo em redução de custos.

A utilização de armamento pelos funcionários da segurança se mostrou desejável para atingir os objetivos de eficácia do SisPF na instalação hipotética considerando sua estrutura e os cenários de ameaça postulados. Apesar de permitida atualmente em ambientes hospitalares, o uso de armas de fogo não é uma prática comum em muitas instalações. Uma solução sugerida, visto o grande risco de profissionais armados em locais onde há grande número de pessoas, como o caso de recepções e emergências de hospitais, é realizar procedimentos de controle de armamentos no controle de acesso do hospital, como por exemplo, utilizando um dispositivo detector de metais. Também realizar fiscalização de segurança de todos os materiais que entram na instalação. Estas alternativas ajudariam a reduzir a possibilidade de entrada de criminosos armados, porém não excluem a entrada por outros meios (como em um paciente de emergência) ou por ameaças mais agressivas. Sugere-se então que para a neutralização de um adversário com os armamentos considerados na ABP e se não utilizada a presença de segurança armada na instalação hospitalar, a equipe interna de resposta possa contar com comunicação efetiva junto a defesa civil.

Apesar das instalações que utilizam fontes terem um projeto estrutural desenvolvido para dificultar o acesso às fontes radioativas, o fato da maioria dos serviços de radioterapia serem construídos previamente à adequação da norma 2.06 se mostra desafio à sua adequação, envolvendo investimento em elementos de segurança, elaboração e reestruturação de procedimentos internos, bem como envolvimento de outras equipes para suporte estrutural e conscientização profissional.

## 7.1 Propostas para trabalhos futuros

- Pesquisas que levem a uma estimativa mais clara de grupos mal-intencionados e das ameaças atuais brasileiras às práticas clínicas e instalações hospitalares, podendo assim reformular a ABP e análise de caminhos propostos.
- Exercícios práticos da aplicação da metodologia DEPO, após a revisão conceitual, utilizando instalações reais de radioterapia, com medidas dos tempos de acordo com as plantas de cada instalação, prevendo métodos de avaliação de sensores e alarmes e dos mecanismos de retardo, podendo assim determinar as falhas e pontos críticos da instalação, avaliando a eficácia do sistema para otimizá-lo.
- Medidas acerca do tempo de retirada da fonte da instalação, considerando os caminhos traçados pelos adversários, podendo-se estimar o tempo real necessário para que as forças de resposta atuem e sejam capazes de neutralizar os adversários.
- Análise do impacto de falhas ou ataques relativos à segurança cibernética dos registros e procedimentos de proteção física.
- Considerar alternativas para detectar conluio de adversários externos com internos.
- Estabelecer os critérios para seleção de funcionários.
- Formulação um programa de treinamento periódico baseado nos itens descritos na norma CNEN 2.06 em relação à utilização de materiais radioativos e os riscos associados.
- Estruturação e avaliação dos procedimentos de contingência realizados após a detecção positiva de ameaça, considerando a equipe atuante na instalação e principalmente quando as ações de contingência envolverem suporte de forças externas como as da Defesa Civil.

## 8. REFERÊNCIAS

- CAPUCCI, Renata. **Homens rendem e roubam armas de vigilantes da Usina Nuclear em Angra**. G1, 30 abr, 2012. Disponível em: <http://glo.bo/lov05k>
- CASALLAS, Pedro. **Las bases de la gestión de la seguridad física**, módulo 1, Isótopo, 2021. Disponível em: <https://contenido.isotopo.org/courses/bases-de-gestion>
- CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **NN 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Rio de Janeiro, CNEN, 2005. Disponível em [www.cnen.gov.br](http://www.cnen.gov.br).
- CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **NN 2.06 Proteção Física de Fontes Radioativas e Instalações Radiativas Associadas**. Rio de Janeiro, CNEN, 2019. Disponível em [www.cnen.gov.br](http://www.cnen.gov.br).
- CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **NN 6.10 Requisitos de Proteção Radiológica para Serviços de Radioterapia**. Rio de Janeiro, CNEN, 2017. Disponível em [www.cnen.gov.br](http://www.cnen.gov.br).
- CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**. Rio de Janeiro CNEN, 2020. Disponível em [www.cnen.gov.br](http://www.cnen.gov.br).
- COI, Instituto COI, 2021, Perguntas frequentes sobre braquiterapia. Disponível em [www.institutocoi.org/sobre-o-cancer/perguntas-e-respostas/braquiterapia/](http://www.institutocoi.org/sobre-o-cancer/perguntas-e-respostas/braquiterapia/)
- COUTINHO, Felipe; HAIDAR, Daniel. **Polícia Federal descobre rede de apoiadores do Estado Islâmico em São Paulo**. G1, Época, 10 set 2015. Disponível em: <https://epoca.oglobo.globo.com/tempo/noticia/2015/09/policia-federal-descobre-rede-de-apoiadores-do-estado-islamico-em-sao-paulo.html>
- ESTRO, European Society for Radiotherapy and Oncology. **Ir-192 HDR Sources**. ESTRO, 2021. Disponível em <https://www.estro.org/About/ESTRO-Organisation-Structure/Committees/GEC-ESTRO-Committee/GEC-ESTRO-BRAPHYQS/Ir-192-HDR>
- FERREIRA, Cristiano. **RJ está mobilizado na busca por carro roubado com selênio, diz secretário**. G1, 4 abr, 2012. Disponível em: <http://glo.bo/IPWy3m>
- GARCIA, Mary L. **The design and evaluation of physical protection systems**. Second Edition. Butterworth-Heinemann – Elsevier Science Nova Iorque, USA, 2008.
- IAEA, International Atomic Energy Agency. Human Health Report no 10 **Radiotherapy Facilities: Master Planning and Concept Design Consideration**. IAEA, Viena, Austria 2014. Disponível em [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)

IAEA, International Atomic Energy Agency. Nuclear Security Series, No 11-G (rev 1) Implementing Guide **Security of Radioactive Material in Use and Storage and of Associated Facilities**. IAEA, Viena, Austria 2019. Disponível em [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)

IAEA, International Atomic Energy Agency. Nuclear Security Series, No 8-G (rev 1) Implementing Guide **Preventive and Protective Measures against Insider Threats**. IAEA, Viena, Austria 2020. Disponível em [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)

INCA, Instituto Nacional do Câncer. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/noticias/brasil-tera-625-mil-novos-casos-de-cancer-cada-ano-do-trienio-2020-2022>

IPEN, **Material radioativo roubado no interior do RS**. IPEN, Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2015. Disponível em: [https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/interna.php?secao\\_id=38&campo=2982](https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=38&campo=2982)

KHAN, Faiz M; GIBBONS, John P. **The Physics of Radiation Therapy**. 5ª edição. Lippincott Williams & Wilkins. Philadelphia, PA, USA. 2014

microSelectron Digital. **Brachytherapy afterloading platform: users manual**. Disponível em: <https://linear-al.com/wp-content/uploads/2017/08/MicroSelectron-brochure.pdf>

microSelectron HDRI. **Source return ADIC container**. Document ID 090387ENG-12, 2019, Elekta.

MONTEIRO, Joselio. **Novos Requisitos Regulatórios para a Segurança Física de Fontes e Instalações Radiativas**. Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro RJ, Brasil. 18 de agosto de 2020. 1h 43 min. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=cRpruXN-tm4> . Participação de Josélio Monteiro e Juan Bernal.

NSSEP, Nuclear Security Science and Safeguards Education Portal, **NSSEP: Physical Protection Systems**, NSSPI, US, Texas, 2021.

NSSEP, Nuclear Security Science and Safeguards Education Portal, **NSSEP: Threats to Nuclear Security**, NSSPI, US, Texas, 2021.

PTB, Physikalisch-Technische Bundesanstalt. **Determination of a radiation quality correction factor for well-type ionization chambers for the determination of the dose rate of cobalt-60 brachytherapy sources**, PTB, Deutschland, 2015.

SBRT, Sociedade Brasileira de Radioterapia. **RT 2030: Plano de Desenvolvimento da Radioterapia para a Próxima Década**. SBRT, 2021.

SILBAR SECURITY, 2020. 5 tips in determining the right number to hire for your business. Disponível em: <https://silbarsecurity.com/5-tips-in-determining-the-right-number-to-hire-for-your-business/>

SNL, SANDIA NATIONAL LABORATORIES, **International Training Course on Physical Protection of Nuclear Material and Facilities**, 2015.

SOUZA, Dicler de Mello e. **Assalto termina com dois mortos na área da Usina Nuclear de Angra**. G1, 13 ago, 2013. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/rio/assalto-termina-com-dois-mortos-na-area-da-usina-nuclear-de-angra-9648758>

TAVARES, Renato Luis Alves. **Projeto e avaliação do sistema de proteção física de uma instalação nuclear**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

TAUHATA, Luiz. **Radioproteção e dosimetria: Fundamentos**. 9ª revisão. Instituto de Radioproteção e Dosimetria: Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2013

USC, Universidade de Santiago de Compostela. Radiation Physics Laboratory, 2021. Disponível em <https://www.usc.gal/en/investigacion/riaidt/radiofisica/equipment.html>

VAZ, Antônio Carlos Alves. **Implementação e avaliação do sistema de proteção física do reator IEA-R1**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br>.

WILLIAMS, James D. **Physical Protection System Design and Evaluation**. International Conference of Physical Protection of Nuclear Materials: Experience in Regulation, Implementation and Operations. IAEA, Vienna, 1997.

WINS, World Institute for Nuclear Security, **Security by Design - International Best Practice Guide**, Vienna Austria. WINS. 2010

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**  
**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**  
**Fone (11) 2810-1570 ou (11) 2810-1572**  
**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**  
**<http://mprofissional.ipen.br>**

**O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Governo do Estado de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) do Governo Federal.**