



AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE EM INSTALAÇÕES
DE INSPEÇÕES DE CARGAS E CONTÊINERES COM O USO DE ACELERADOR
LINEAR DE PARTÍCULAS

Samuel Queiroz Pelegrineli

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2024

AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE EM INSTALAÇÕES
DE INSPEÇÕES DE CARGAS E CONTÊINERES COM O USO DE ACELERADOR
LINEAR DE PARTÍCULAS

Samuel Queiroz Pelegrineli

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Aprovada por: Prof. Ademir Xavier da Silva
Prof^ª. Inayá Corrêa Barbosa Lima
Dr. César Marques Salgado
Prof. Edson Ramos de Andrade
Prof. José Marques Lopes

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2024

Pelegrineli, Samuel Queiroz

Avaliação da equivalente de dose ambiente em instalações de inspeções de cargas e contêineres com o uso de acelerador linear de partículas / Samuel Queiroz Pelegrineli – Rio de Janeiro COPPE/UFRJ, 2024.

XVII, 142 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 118-123

1. Inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres, 2. Equivalente de dose Ambiente, 3. Serviço de Proteção Radiológica. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“Honra teu pai e tua mãe, a fim de que tenhas vida longa
na terra que o Senhor, o teu Deus, te dá”. Êxodo 20:12

$$\lim_{x \rightarrow \infty} vida(x) = [Duda(x) + Antônio(x)]$$

AGRADECIMENTO

A Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele está jornada não seria cumprida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ademir Xavier da Silva, por me receber como aluno de doutorado. Obrigada pela confiança no meu trabalho, pelo respeito e por me ensinar.

Agradeço o apoio e cooperação com Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN) do Exército Brasileiro, que nos forneceu os monitores para a realização das medidas. O apoio, participação e cooperação da empresa EBCO SYSTEMS LIMITADA, foi de extrema importância para proposta e execução deste trabalho.

Agradeço e muito aos companheiros Edson Ramos de Andrade, Wagner de Souza Pereira e Wilson Serraine da Silva, que com muita dedicação e carinho, dispuseram a compartilhar o seu conhecimento no campo da análise de dados e fundamentação teórica. Agradeço a equipe do IDQBRN: Luciano Santa Rita Oliveira, Aneuri Sousa de Amorim e Domingos d'Oliveira Cardoso. Agradeço aos membros e amigos da empresa EBCO SYSTEMS, equipe de proteção radiológica: Ana Paula Dias de Melo Andrade, Fábio de Oliveira Neves e Jefferson Vicente dos Santos, e aos diretores nas pessoas de Luiz Claudio A. de S. Santoro e Márcio R. B. Lima de Azevedo. Todos foram extremamente importantes no aprimoramento das ideias, refletindo juntos na contribuição que ajudaram em inovar o caminho desta investigação.

Agradeço a minha mãe Alzira Ferreira Queiroz Pelegrineli e meu pai Pedro Custódio Pelegrineli, aos meus familiares, meus lindos avós, tios e primos, que tanto me apoiaram nos estudos, sempre valorizando a educação. E principalmente a minha linda família: esposa Michele da S. Rodrigues e filhos Maria Eduarda da S. Rodrigues (Duda) e Antônio da Silva Queiroz, que me apoiaram incondicionalmente.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE EM INSTALAÇÕES
DE INSPEÇÕES DE CARGAS E CONTÊNERES COM O USO DE ACELERADOR
LINEAR DE PARTÍCULAS

Samuel Queiroz Pelegrineli

Março/2024

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

Assumindo que as barreiras físicas da área controlada, em uma instalação de inspeção de carga e contêineres, podem ser violadas, este trabalho tem como justificativa a necessidade de uma estimativa de dose dentro e fora desta área, e como objetivo contribuir para a otimização, cultura de segurança, escolha da instrumentação radiológica, estimativa de dose equivalente e riscos, além de identificar os pontos de maior equivalente de dose ambiente, recomendações de cultura de segurança e estabelecer critérios de proteção radiológica. Foi utilizado abordagem qualitativa e quantitativa, na pesquisa de campo que ocorreu em instalações, classificadas no subgrupo 7C conforme Norma CNEN NN-6.02, que está autorizada a operar, sob o ponto de vista de proteção radiológica, na área de Segurança. O equipamento emissor de radiação, é um acelerador de partículas do fabricante Smiths Heimam, modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV. Durante as atividades de medida *in-situ* foram utilizados cinco monitores de radiação pessoal modelo RadEye PRD-ER, do tipo detector cintilador, cinco monitores de radiação pessoal modelo MRAD 111, do tipo detector Geiger-Muller, um detector e identificador SpiR-ID, modelo F 8929 MGP e foram utilizados seis dosímetros de área, modelo OSLD. Para o acelerador modelo HCVM, de energia 3,8 MeV, durante medições *in loco*, foram utilizados um Geiger Muller, fabricante: Thermo Scientific, modelo: FH40 GL10, duas Câmaras de Ionização, uma FLUKE, modelo: 451P e uma LUDLUM, modelo: 9DP. Para o equipamento SpiR ID colocado no ponto do modulador, ocorreu a saturação do cintilador, muito semelhante ao que ocorreu com o equipamento RadEye PRD-ER. Para a investigação da dose no motorista utilizando o equipamento SpiR-ID e dosímetros OSLD, verificou-se que o número de escaneamentos necessários para não ultrapassar o limite anual para indivíduos do público é superior a 18.000 escaneamentos. Externo a área demarcada os valores registrados são indistinguíveis daqueles considerados radiação de fundo. As taxas de dose no canal de inspeção de contêiner diminuem exponencialmente após o distanciamento do feixe de transmissão e a partir de 5 metros do feixe de transmissão o valor encontrado está abaixo de 10 $\mu\text{Sv/h}$. Estabeleceu-se uma metodologia para equipamentos que operem no modo Móvel sem a necessidade de escanear a cabine do motorista e sem aumentar as doses de radiação espalhada. Dessa forma, o serviço de inspeção pode ser otimizado, aplicando procedimentos seguros e eficientes. Os resultados mostraram que os riscos são baixos à saúde e à segurança dos trabalhadores que atuam com a inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres, com uso de raios X de alta energia.

Abstract Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc)

EVALUATION OF AMBIENT DOSE EQUIVALENT IN CARGO AND
CONTAINER INSPECTION FACILITIES USING A LINEAR PARTICLE
ACCELERATOR

Samuel Queiroz Pelegrineli

March/2024

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

Assuming that the physical barriers of the controlled area, in a cargo and container inspection facility, can be violated, this work is justified by the need for a dose estimate inside and outside this area, and aims to contribute to the optimization, culture of safety, choice of radiological instrumentation, estimation of equivalent dose and risks, in addition to identifying the points of highest ambient dose equivalent, safety culture recommendations and establishing radiological protection criteria. A qualitative and quantitative approach was used in field research that took place in facilities, classified in subgroup 7C according to CNEN Standard NN-6.02, which is authorized to operate, from the point of view of radiological protection, in the Security area. The radiation-emitting equipment is a particle accelerator from the manufacturer Smiths Heimam, model HCVP4029, with a maximum energy of 4.5 MeV. During the in-situ measurement activities, five personal radiation monitors, model RadEye PRD-ER, of the scintillator detector type, five personal radiation monitors, model MRAD 111, of the Geiger-Muller detector type, a SpiR-ID detector and identifier, were used. model F 8929 MGP and six area dosimeters, model OSLD, were used. For the HCVM model accelerator, with energy 3.8 MeV, during in situ measurements, a Muller Geiger, manufacturer: Thermo Scientific, model: FH40 GL10, two Ionization Chambers, a FLUKE, model: 451P and a LUDLUM, model were used. : 9DP. For the SpiR ID equipment placed at the modulator point, scintillator saturation occurred, very similar to what occurred with the RadEye PRD-ER equipment. For the investigation of driver dose using the SpiR-ID equipment and OSLD dosimeters, it was found that the number of scans required to not exceed the annual limit for members of the public is greater than 18,000 scans. Outside the demarcated area, the recorded values are indistinguishable from those considered background radiation. The dose rates in the container inspection channel decrease exponentially after moving away from the transmission beam and from 5 meters away from the transmission beam the value is found to be below 10 $\mu\text{Sv/h}$. A methodology was established for equipment that operates in Mobile mode without the need to scan the driver's cabin and without increasing the doses of scattered radiation. This way, the inspection service can be optimized, applying safe and efficient procedures. The results showed that the risks to the health and safety of workers who work with Cargo and Container Safety Inspection are low, using high-energy X-rays.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. Entendendo a prática de inspeção de segurança com uso de raios X.....	1
1.1.1. Motivação para Implementação dos Escâneres de Raios X.....	2
1.2. Justificativa do Trabalho.....	3
1.3. Objetivo do Trabalho.....	4
1.3.1. Objetivo Geral.....	4
1.3.2. Objetivo Específico	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. Estudos de Levantamentos de Doses	5
CAPÍTULO 3.....	14
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
3. Sistema de Proteção Radiológica em Inspeção de Segurança de Carga e Contêineres	14
3.1. Objetivo e Eficácia da Proteção Radiológica na Prática de Inspeção de Segurança	14
3.2. Bases Científicas na Proteção Radiológica em Serviços de Inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres.....	16
3.3. Estrutura Conceitual da Proteção Radiológica na Prática de Inspeção de Segurança	17
3.4. Principais Organizações Internacionais.....	19
3.5. Quadro Estrutural do Sistema de Proteção Radiológica.....	21
3.6. Medidas de Proteção Radiológica do Sistema de Inspeção de Cargas e Contêineres	26
3.6.1. Colimador de Chumbo	26
3.6.2. Blocos de Blindagem atrás dos Braços do Detector.....	28

3.6.3. Parede de Blindagem	28
3.6.3.1. Radiação de Fundo (Background)	30
3.6.4. Dispositivos de Intertravamento de Segurança Eletrônico - “interlock”.	31
3.6.4.1. Dispositivo de Parada de Emergência e Sistema de Segurança com “interlock”.	32
3.6.4.2. Indicador de Advertência, Equipamento de Monitoração e Comunicação.	35
3.6.4.3. Sensores Infravermelho, Foto sensível e Loop Indutivo	40
3.6.5. Monitoração Individual e de Área	41
3.7. Controle de Saúde e Segurança dos Operadores do Sistema	43
3.7.1. Supervisão Médica e Qualificação dos Operadores de Sistema	43
3.7.2. Controle de Saúde do Pessoal Operacional do Sistema	44
3.7.3. Controle da Monitoração Individual dos Operadores	45
3.7.3.1. Objetivo da Monitoração Individual	45
3.7.3.2. Responsabilidade da Monitoração Individual	45
3.7.3.3. Localização de Uso do Dosímetro	46
3.7.4. Limite de Dose Individual para Trabalhadores	46
3.8. Segurança Operacional no Serviço de Inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres	47
3.8.1. Antes da Operação	47
3.8.2. Cuidados Operacionais	48
3.8.3. Cuidados no Procedimento de Manutenção	49
3.8.4. Estrutura Operacional em Situações de Emergência	49
3.8.4.1. Tipos de Acidentes Possíveis em Instalações de Inspeção de Bagagens e Contêineres	50
3.9. Descrição de Eventos em Instalação Radiativa de Inspeção de Segurança de Bagagens e Contêineres	54

3.9.1.	Descrição dos eventos.....	54
3.9.1.1.	Evento 1: Falha no sistema de câmeras de vídeo	55
3.9.1.2.	Evento 2: Presença de pessoas dentro da área controlada	56
3.9.1.3.	Evento 3: Falha nos monitores de radiação portáteis	57
3.9.1.4.	Evento 4: falha de comunicação entre sala de comando e área externa	57
3.9.1.5.	Evento 5: perda da visualização da imagem escaneada na tela.....	57
3.9.1.6.	Evento 6: Falha no monitor fixo de área	58
3.9.1.7.	Evento 7: Pane nos sistemas luminosos e sonoros.....	59
3.9.1.8.	Evento 8: Pane nos sensores.....	59
3.9.1.9.	Evento 9: Falha na blindagem	60
3.9.1.10.	Evento 10: Falha no sistema de intertravamento	61
	CAPÍTULO 4.....	64
4.	Materiais e Métodos	64
4.1.	Equipamentos utilizados no acelerador de partículas modelo HCVP .	65
4.2.	Levantamento dos dados no acelerador de partículas modelo HCVP .	66
4.3.	Equipamento e levantamento dos dados no acelerador de partículas modelo HCVM-MOBILE	74
	CAPÍTULO 5.....	76
5.	Resultados e Discussão	76
5.1.	Valores de equivalente de dose ambiente [H*(10)] para o medidor Radeye e MRAD dentro da área controlada.....	76
5.2.	Valores da taxa de dose equivalente ambiente H*(10) fora da área controlada	79
5.3.	Valores da taxa de dose equivalente ambiente H*(10) na cabine do caminhão	79
5.4.	Taxa da dose equivalente ambiente no canal de passagem do caminhão.	84

5.5. Comparativo entre a equivalente de dose ambiente para feixe transmitido e exposições a radiações conhecidas pelos seres humanos	86
5.6. Descrição de cenários e dose equivalente ambiente estimada, sob o ponto de vista de proteção radiológica	93
5.7. A análise para a investigação da dose equivalente ambiente, utilizando dosímetros de área durante cinco anos consecutivos	94
5.8. Valores da dose equivalente ambiente integrada na cabine do motorista em inspeções de cargas e contêineres para sistema de inspeção HCVM (Heimann Cargo Vision Mobile)	105
5.8.1. Dose equivalente integrada na cabine do motorista para operação HCVM, instalação X.	105
5.8.2. Dose equivalente integrada na cabine do motorista para operação HCVM, instalação Y.	109
CAPÍTULO 6.....	111
Conclusão.....	111
Constatações.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
ANEXO 1: CONTEÚDOS COMPLEMENTARES DESENVOLVIDOS	124
Período de Calibração dos Medidores	124
ANEXO 2: ARTIGOS PUBLICADOS	140

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1: Um equipamento dá origem a doses individuais de diferentes indivíduos (imagem própria).....	15
Figura 2: Agência Nacional Reguladora em Proteção Radiológica - Comissão Nacional de Energia Nuclear (www.gov.br).	18
Figura 3: Organizações Internacionais ICRP e ICRU.	21
Figura 4: Símbolo da Organização Internacional UNSCER.	21
Figura 5: Colimador de Chumbo, parte frontal.	27
Figura 6: Colimador de Chumbo - parte interna.....	27
Figura 7: Bloco de Blindagem Atrás dos Braços do Detector.....	28
Figura 8: Exemplo de parede de blindagem em instalação de cargas e contêineres. ...	29
Figura 9: Exemplo de parede de blindagem em outra instalação de cargas e contêineres.....	29
Figura 10: Parede de Blindagem Parte Externa do exemplo da Figura 9.....	30
Figura 11: Safety Culture.....	31
Figura 12: Botoeira de emergência no modulador.	33
Figura 13: Botoeira de emergência colocado ao lado do sistema de detecção dos fótons, para um tipo de instalação.	33
Figura 14: Botoeira de emergência no console do painel de comando para um tipo de instalação.	34
Figura 15: Chave do Controle do Acelerador.....	34
Figura 16: Sinalização: Entrada Permitida.	35
Figura 17: Sinalização: Indicativo de Entrada Proibido.	36
Figura 18: Sinalização com placas e advertência.	37
Figura 19: Sinalização com placas para outro tipo de instalação de cargas e contêineres.....	37
Figura 20: Imagens de monitoração das câmeras de vídeo estrategicamente posicionadas.	38
Figura 21: Câmeras de vídeo estrategicamente posicionadas.....	38
Figura 22: Saída de som do portal de escaneamento para um tipo de instalação.	39
Figura 23: Câmeras no decorrer da área para um tipo de instalação.	39

Figura 24: Dispositivos de infravermelho ao longo da pista de inspeção para um tipo de instalação.	40
Figura 25: Sensor Foto Sensitivo.....	41
Figura 26: Monitor Individual (Dosímetro).....	41
Figura 27: Exemplos de Monitores Portáteis.....	42
Figura 28: Monitor de Área Fixo.	42
Figura 29: Equipamento de medição colocado na parte superior do Modulador, dentro da cabine onde fica o acelerador, referente ao ponto 1.	67
Figura 30: Equipamento de medição fixado na parede externa de saída do feixe de raios X, dentro da cabine onde fica o acelerador, referente ao ponto 2.....	67
Figura 31: Equipamentos de medição fixados na área controlada, referente ao ponto 3, 4 e 5.	68
Figura 32: Esquema indicando a localização dos cinco pontos de medida selecionados conforme descrição da Tabela 3.	69
Figura 33: Equipamento SpiR-ID colocado na parte superior do Modulador, dentro da cabine onde fica o acelerador - Ponto 1.....	70
Figura 34: Esquema indicando os pontos de medidas com o equipamento SpiR-ID...	71
Figura 35: Imagem da localização dos dosímetros de área extra (1 a 6) e vista do equipamento.	73
Figura 36: Imagem vista do equipamento HCVM	74
Figura 37: Apresenta os resultados $H^*(10)[nSv]$ comparados das duas campanhas de medida (Grupos 1 e 2).	77
Figura 38: Comportamento da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)[microSv/h]$, campanha 1.....	83
Figura 39: Comportamento da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10) [microSv/h]$, campanha 2.....	83
Figura 40: Medida da taxa de dose equivalente ambiental em sete pontos do canal de passagem do caminhão, valor médio (Mean) e máximo (Max).	86
Figura 41: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Dezembro (2021) – Instalação ALFA equipamento APVL	129
Figura 42: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Agosto (2022) – Instalação ALFA equipamento APVL	130

Figura 43: Comportamento do teste de aferição de Outubro a Dezembro (2022) – Instalação ALFA equipamento APVL.	130
Figura 44: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Março – Instalação ALFA equipamento Thermo.	131
Figura 45: Comportamento do teste de aferição de Junho a Dezembro (2022) – Instalação ALFA equipamento Thermo.	132
Figura 46: Comportamento do teste de aferição de Abril a Dezembro (2022) – Instalação BETA equipamento APVL.	133
Figura 47: Comportamento do teste de aferição de Novembro (2022) a Abril (2023) – Instalação BETA equipamento APVL.	134
Figura 48: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Junho (2022) – Instalação GAMA equipamento Ludlum.	135
Figura 49: Comportamento do teste de aferição de Setembro a Dezembro (2022) – Instalação GAMA equipamento Ludlum.	135
Figura 50: Comportamento do teste de aferição de Fevereiro a Dezembro (2022) – Instalação GAMA equipamento APVL.	136
Figura 51: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Fevereiro (2022) – Instalação GAMA equipamento APVL.	137
Figura 52: Comportamento do teste de aferição de Abril a Dezembro (2022) – Instalação GAMA equipamento APVL.	137

INDICE DE TABELAS

Tabela 1: Relação de Recomendações ICRP e Normas Básicas da IAEA.....	20
Tabela 2: Evento Indicador, Evento Iniciador, Consequências e Sugestões.	62
Tabela 3: Descrição dos Pontos Críticos	67
Tabela 4: Descrição dos sete pontos de monitoração (Figura 34) dentro da área controlada para o equipamento SpiR-ID.	71
Tabela 5: Descrição dos pontos de monitoração (Figura 34) fora da área controlada e na cabine do motorista para o equipamento SpiR-ID.....	72
Tabela 6: Descrição dos pontos onde foram localizados os dosímetros de área, referente a Figura 35.....	73
Tabela 7: Equivalente de dose ambiente integrada (μSv) com RadEye e MRAD nos pontos e Grupo 1 e Grupo 2.	76
Tabela 8: Equivalente de dose ambiente [$\mu\text{Sv}/\text{scan}$] para RadEye PRD-ER (A) e MRAD 111 (B).....	78
Tabela 9: Taxas de dose equivalente ambiente [$\mu\text{Sv}/\text{h}$], para RadEye PRD-ER (A) e MRAD 111 (B).....	78
Tabela 10: Descrição dos Pontos e taxa de doses equivalente ambiente fora da área de varredura.....	79
Tabela 11: Taxa $H^*(10)$ no interior da cabine do caminhão, campanha 1.	81
Tabela 12: Taxa $H^*(10)$ no interior da cabine do caminhão, campanha 2.	82
Tabela 13: Descrição da taxa de dose equivalente para os sete pontos de monitoração (Figura 34) dentro da área controlada para o equipamento SpiR-ID.	85
Tabela 14: Relação comparativa de exames, exposição natural e escaneamento no ponto do feixe transmitido.....	89
Tabela 15: Relação entre exposições por radiação natural e exposição no ponto do feixe transmitido.....	91
Tabela 16: Relação entre dose letal para seres humanos em exposição de corpo inteiro e número de escaneamento no ponto do feixe transmitido.....	92
Tabela 17: Relação entre estimativa dos limites de dose única e aguda, e número de exposições por escaneamento.....	93
Tabela 18: Cenário, evento indicador, consequências e dose ambiente estimada.....	93

Tabela 19: Relação de número de escaneamento ano e dose equivalente ambiente acumulada utilizando dosímetros de área, para instalação A.	95
Tabela 20: Dose equivalente ambiente acumulada por número de escaneamento, para instalação A.	98
Tabela 21: Relação de número de escaneamento ano e dose equivalente ambiente acumulada utilizando dosímetros de área, para a instalação B.....	99
Tabela 22: Dose equivalente ambiente acumulada por número de escaneamento, para instalação B.	102
Tabela 23: Cada valor representa a dose equivalente integrada na cabine do motorista para operação HCVM-Mobile.	107
Tabela 24: Cada valor representa a média realizada para cinco escaneamento, fornecendo a média da dose equivalente ambiente integrada.....	109
Tabela 25: Panorama geral das principais instalações radiativas com seus modos de operação.....	127

ABREVIATURAS

AIEA - International Atomic Energy Agency – Agência Internacional de Energia Atômica

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CERN - Centro Europeu de Pesquisas Nucleares

HCVP – Heimann Cargo Vision Portal

HCVM – Heimann Cargo Vision Mobile

ICRP - International Commission on Radiological Protection – Comissão Internacional de Proteção Radiológica

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements – Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação

IOE - Indivíduo Ocupacionalmente Exposto

IP - Indivíduo do Público

LINAC - Linear Particle Accelerator - Acelerador de Partículas Linear

NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurements

OSL - Optically Stimulated Luminescence

PPR - Plano de Proteção Radiológica

SLAC - Stanford Linear Accelerator Center

SPR - Supervisor de Proteção Radiológica

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Entendendo a prática de inspeção de segurança com uso de raios X

A descoberta dos raios X por Wilhelm Conrad Roentgen em 1895, na Alemanha, caracterizou um marco. A medicina, a agronomia, a indústria e a segurança foram amplamente beneficiadas a partir de então, conquistando possibilidades anteriormente não existentes. O ramo da segurança passou a contar com essa radiação para fins de sistema de inspeção de escaneamento rápido de objetos, bagagens, veículos, contêineres etc. Proporcionando maior segurança capaz de gerar imagens de alta definição e qualidade, possibilitando encontrar e identificar materiais escondidos (FILHO, 2020; GOMES, 2013).

Embora os raios X tenham sido usados há muito tempo em inspeção de bagagem e aplicações médicas, aplicações em energias mais elevadas (milhões de elétron volts) para objetos de maior porte só foi tentado pela primeira vez na década de 1990 e totalmente desenvolvido na década de 2000 (SHEN, 2015).

Os primeiros sistemas eram adaptações personalizadas de equipamentos de inspeção industrial. Hoje os sistemas de inspeção por raios X são especialmente adaptados para a inspeção de contêineres marítimos, caminhões e vagões em pequenas áreas. A mais recente tecnologia permite que os sistemas produzam rapidamente alta qualidade de imagens, minimizando a interrupção das atividades comercial portuária (REED, 2011).

A mais conhecida prática de inspeção de bagagens por raios X, permite que acometimentos possam ser estudados em um objeto, como por exemplo malas em aeroportos, sem a necessidade de procedimento invasivo para este diagnóstico. Com o avançar do tempo, essa técnica foi adaptada para outros métodos da segurança pública no mundo como a inspeção de cargas e contêineres com uso de aceleradores de partículas, instalado na entrada

ou saída das passagens de inspeção alfandegárias, nos portos marítimos, centrais de transporte de cargas e zonas de entrepostos aduaneiros, possibilitando aquisições de imagens de cargas e contêineres com procedimentos minimamente invasivos, capaz de gerar imagens de alta qualidade e detectar contrabando escondidos em contêineres totalmente carregados, o que trouxe à tona uma solução efetiva para os vários problemas e desvantagens do método de inspeção tradicional (REED, 2011).

Dois componentes principais são responsáveis por determinar a qualidade final da imagem de raios X que um sistema produz. Primeiro, a fonte de raios X deve ter energia suficiente para penetrar no contêiner mais densamente carregado. Em segundo lugar, a matriz do detector, que é a componente que captura os raios X que penetram no detector e os converte em sinais elétricos, deve ser sensível e possuir uma ampla faixa dinâmica para fornecer dados com precisão do objeto que está sendo escaneado (REED, 2011).

As demais tecnologias dessa área empregam as mais diversas intensidades de raios X, que é uma radiação ionizante de alto poder de penetração. Essa radiação possui a capacidade de ejetar elétrons de seus conjuntos atômicos. Essa radiação ionizante aplicada a um sistema de inspeção de segurança não invasiva é uma ferramenta utilizada na fiscalização no Brasil, e diz respeito à proteção contra o terrorismo, contrabando de mercadorias, tráfico de drogas e substâncias psicotrópicas, evasão fiscal, etc. Este equipamento utiliza a tecnologia de formação da imagem por meio de fótons de raios X (ondas eletromagnéticas de curto comprimento de onda e alta frequência, que se propaga de forma linear, não tem massa e não tem carga elétrica, é uma onda transversal), que são gerados em um acelerador de partícula de alta energia (SILVA FILHO, 2020).

1.1.1. Motivação para Implementação dos Escâneres de Raios X

Em todo o mundo, os sistemas de inspeção de imagens de carga destinam-se, geralmente, a identificar práticas ilegais, como tráfico de armas, explosivos, drogas, contrabando de mercadorias e até tráfico de seres humanos por meio da geração de imagens a partir do escaneamento de objetos, como contêineres de carga, veículos, trens, caminhões ou

barcos. Estes sistemas ganharam popularidade na última década e seu uso se expandiu rapidamente (GOMES, 2013).

Após o atentado de 11 de setembro em Nova York, o alcance global das organizações terroristas gerou preocupação na possibilidade de se explorar cargas em navios. Utilizando redes de transporte marítimo, terroristas poderiam lançar um ataque usando materiais nucleares ou outros materiais radioativos especiais em uma arma de destruição em massa ou dispositivo de dispersão radiológica. (BENNETT, 2008).

Com base na ameaça imposta por contêineres marítimos, os Estados Unidos da América (EUA) usaram medidas regulatórias para aumentar a segurança marítima, estendendo a fronteira de inspeção para exigir o escaneamento de contêineres com destino aos EUA. Em 2007, o então presidente George W. Bush assinou uma lei exigindo que todas os contêineres sejam escaneados com equipamento de inspeção não invasiva para examinar a carga, bem como o uso de monitores de portal de radiação para detectar a presença de radiação gama e radiação de nêutrons. (BENNETT, 2008)

1.2. Justificativa do Trabalho

Assumindo que as barreiras físicas da área controlada podem ser violadas, este trabalho tem como justificativa a necessidade de uma estimativa de dose dentro e fora da área controlada. Criando parâmetros que possam ser úteis em casos de acidentes, permitindo assim o estudo de cenários e eventos de exposição, criando parâmetros que serão úteis em casos de investigação e apoiando em sugestões para criação de normas em inspeções de cargas e contêiner, úteis na segurança pública, colaborando para a otimização, cultura de segurança, escolha da instrumentação radiológica e estimativa de dose equivalente, em termos de proteção radiológica em procedimentos ligados à área de inspeção de segurança de cargas e contêineres.

1.3. Objetivo do Trabalho

1.3.1. Objetivo Geral

Identificar os pontos de maior equivalente de dose ambiente, em instalações que utilizam acelerador linear de partículas, criando um croqui dos pontos de maior equivalente de dose ambiente integrada por escaneamento, cálculo de limites derivados, recomendações de cultura de segurança e sugerindo critérios de proteção radiológica.

1.3.2. Objetivo Específico

- Utilizar mais de um tipo de medidores de radiação, que sejam redundantes, diversos e independentes, para fins de medição na pesquisa relacionada;
- Realizar as medições, para coletas de dados e estimando a equivalente de dose ambiente integrada e dose por passagem para cada ponto de interesse;
- Realizar um comparativo entre a equivalente de dose ambiente no escâner e exposições a radiações conhecidas pelos seres humanos;
- Descrição de cenários e dose equivalente descrita em instalação radiativa classificada no subgrupo 7C conforme Norma CNEN NN-6.02, sob o ponto de vista de proteção radiológica;
- Apresentar a taxa de dose média na posição do motorista;
- Representar o comportamento da exposição sofrida pelo motorista e o número máximo de passagens por dia;
- Fornecer dosimetria de área dos pontos externos, a fim de avaliar a resposta dos dosímetros instalados; e
- Elaborar e validar uma metodologia de escaneamento de contêineres utilizando escâneres móveis, que não exija o escaneamento de todo o caminhão, apenas da carga, evitando a irradiação da cabine do motorista e eliminando a necessidade de sair durante o processo. Garantindo que as doses de radiação dispersas sejam compatíveis com as provenientes dos escâneres do tipo portal, para preservar a segurança dos condutores.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2. Estudos de Levantamentos de Doses

Os principais trabalhos científicos na área de levantamento de doses em instalações de inspeção de carga focam questões ligadas à proteção radiológica, verificando se a prática atende aos limites admissíveis das taxas de dose para indivíduo do público e trabalhadores ocupacionais. Os estudos foram realizados nas áreas controladas e supervisionadas, visando tanto a saúde ocupacional dos operadores da instalação, quanto a dos indivíduos do público, em áreas livres. Estes trabalhos científicos são importantes para comparação das ordens de grandeza das taxas de dose e informações técnicas relevantes sobre o sistema de inspeção de carga.

Em 2004, KHAN e colaboradores efetuaram levantamento de medidas de doses em instalação de inspeção de cargas e contêineres. O estudo mostrou que a dose de radiação equivalente aos passageiros clandestinos é pequena e não representa um perigo para a saúde, pois para a prática ser considerada segura, é extremamente importante que a dose de radiação equivalente nos passageiros clandestinos esteja dentro dos limites aceitáveis. KHAN e colaboradores (2004) utilizaram ainda para avaliação das doses na instalação uso de fantoma humano masculino, chamado RANDO MAN, nas medidas de 175 cm de altura e 73,5 kg, construído com um esqueleto humano natural, moldado dentro de tecido macio simulando o material. Este fantoma foi posicionado dentro dos contêineres em diversas posições de modo a obtenção de cálculos, medidos com a câmara de ionização Victoreen 450. O maior valor medido em um escaneamento com o fantoma posicionado na linha central do contêiner, com alta energia, foi de 0,022 mSv. No uso de detectores passivos OSL o valor medido na altura do peito consistiu numa média de 0,077 mSv por escaneamento. Com o limite de dose admissível para um indivíduo de público de 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007), um indivíduo

poderia ser escaneado, respectivamente 45 e 12 vezes com as medidas apresentadas no estudo que ainda sim estariam nos limites admissíveis. Os dados técnicos do sistema de inspeção no trabalho de KHAN et al (2004) utilizados mostram que a fonte de raios X é um acelerador de elétrons (LINAC – sistema CXR-6M), operado em duas configurações de energia: baixa energia (2 MeV) e alta Energia (6 MeV). O LINAC desta pesquisa produz rajadas curtas de raios X que duram aproximadamente 3 a 4 microssegundos com um pulso variável e taxa de repetição variando de 30 a 300 pulsos por segundo. Outros dados interessantes no trabalho de KHAN et al (2004) foram as medições das taxas de dose a 1 m do alvo devido a cada pulso da fonte. Os resultados apresentaram 8,3 mGy/min (0,83 rad/min) e 16,7 mGy/min (1,67 rad/min) quando operando a baixas (2 MeV) e altas (6 MeV) energias, respectivamente. O autor explica que a taxa de dose pode ser controlada variando a taxa de pulso. KHAN et al (2004) mediu as taxas de dose para energias baixas e altas são 0,250 Gy/ min e 0,5 Gy /min, respectivamente, quando operando a 30 pulsos por segundo. Cabe ressaltar que estas medidas são de aceleradores da prática de inspeção, com o uso de colimadores externos que conforma o feixe “em leque”. Foram abordadas as características do feixe de raios X como largura de 0,254 cm (0,1 polegada), ao deixar o LINAC (momento de disparo), e sua largura é 3,175 cm (1,25 Polegada) quando da chegada ao detector (após atravessar os materiais a serem inspecionados). A distância da fonte para o portal que contém a matriz de detectores é de 4,27 m (KHAN et al, 2004).

Em 2006, MARTZ e colaboradores estudaram a dose equivalente em instalação de inspeção de carga. Seu objetivo foi identificar potenciais problemas de segurança relacionados à exposição à radiação, com o uso da NCRP 151 (NCRP Report nº 151, 2005). Esta norma aborda aspectos de blindagem em instalações médicas que utilizam aceleradores de alta energia. Os autores mostram que os padrões de limites de dose aplicados para trabalhadores são de 50 mSv/ano (ICRP 103, 2007) e para indivíduo do público 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007). A instalação observada utilizava LINATRON M9 (9 MeV), com taxa de dose absorvida de 30 Gy/min a 1 m da fonte (dose equivalente 30 Sv/min, com fator de qualidade de 1,0). Seu feixe em leque utilizou colimadores com 30° de abertura vertical e 5° de largura horizontal. Os autores abordaram eventos anormais que possam ocorrer na prática, tais como os de pessoas não removidas do veículo ou contêiner, incluindo o motorista, em que se admite uma distância padrão de 2 m que seria considerado para cálculo da exposição, com um tempo estimado de 9 s (0,15 min) e com a taxa de dose do acelerador de 30 Gy/min à 1 m

do alvo. MARTZ et al (2006) mostraram que para medidas de taxas de dose ocupacionais, o cálculo e medida do equivalente de dose ambiente da instalação é o principal parâmetro para avaliação das condições de segurança e de radioproteção.

HUPE et al (2006) determinou estudos de dose equivalente pessoal e ambiental dos operadores que trabalham em instalações de triagem de segurança em inspeção de carga. Os autores mencionaram a importância para a proteção radiológica em saber as doses em que as pessoas estão expostas nesse tipo de prática com emprego de raios X de alta energia. Os autores enfatizaram que o equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ é uma unidade de medida usada para quantificar a proteção contra a radiação. Dependendo do tipo de escâner, os autores apresentaram que as doses possam variar de 0,07 a 6 μSv .

O estudo apresentou um escâner por transmissão com feixe de raios X de aproximadamente 2 mm de largura em sua abertura, 3,7 mA de intensidade de corrente, 160 kV. Para medidas do equivalente de dose ambiente, foram utilizadas câmaras de ionização PTB modelo n HS01-112 com 140 mm de diâmetro e volume sensível do detector em 1000 cm^3 . Esse equipamento responde a energias na faixa de 12 keV à 7 MeV, com desvio máximo de 13%, em energia e de alcance 0,8% em ângulo de modo isotrópico, e 5% do desvio máximo na medida da taxa de dose.

Outro medidor utilizado foi o dosímetro eletrônico FH40G-L10 da Thermo Eletron Corporation que utiliza um contador proporcional de 25 mm de diâmetro e 25,8 cm de comprimento.

O alcance desse equipamento é para faixa de energia de 12 keV até 4,4 MeV com desvio máximo de 20% em energia, $\pm 45^\circ$ em alcance de ângulo com 30% de desvio máximo, e no alcance na medida da taxa de dose com desvio máximo de 8%. Importante ressaltar que as incertezas nas medidas com estes tipos de equipamentos variam em função da energia, ângulo de medida e taxa de dose. HUPE et al (2006) analisaram as estimativas das incertezas das medidas, que segundo o autor, é difícil determinação, porque nem todos os parâmetros relevantes são conhecidos. Existem incertezas de calibração da instrumentação (5% para o caso do estudo com PTB-made electronic system). Pelas instabilidades do sistema de escaneamento, as medidas por câmaras de ionização apresentam 3% de incertezas. Sendo assim, o autor faz referência sobre o Guia de Expressão de Incertezas (International Organization for Standardisation, 1993), que apresenta incertezas de doses médias determinadas usando câmara de ionização de aproximadamente 10%.

O trabalho apresentou ainda medidas realizadas em inspeção de carga por transmissão e espalhamento, com 6,65 mA de corrente, 450 kV, foram medidas os H*(10) com FH40G-L10 de 0,2 μ Sv e com o HS01-112 com 0,4 μ Sv no modo de baixa velocidade.

Em 2007, A NCRP *Commentary* n° 20 apresentou os principais tópicos do sistema de medidas e de proteção radiológica relacionada à inspeção de carga com o uso de aceleradores com raios X de alta energia. Este documento normatiza a prática de inspeção norte americana, denominada *Cargo Advanced Automated Radiography System (CAARS)*, do *US Department of Homeland Security (DHS)*. Algumas recomendações importantes da prática norte americana:

- dose efetiva de indivíduos inadvertidamente expostos não poderá exceder 5 mSv, para trabalhadores em área de acesso controlado;
- dose efetiva acumulada em algum ponto de ocupação em área externa ao canal de inspeção não poderá exceder 0,5 μ Sv/h, e por fim, e
- para controle administrativo da área da instalação onde o acesso não é controlado (indivíduo do público) a taxa de dose deverá ser em 0,25 mSv/ano.

A norma descreve as dimensões dos contêineres inspecionados pelos raios X que apresentam 15,3 m x 2,6 m x 4,27 m.

Para monitoramento do sistema, a norma aborda diversos conhecimentos técnicos sobre seu funcionamento. A energia do feixe de elétrons depende da radiofrequência interna gerada na cavidade do acelerador. A taxa de dose do feixe de fótons produzidos poderá ser monitorada por meio da corrente gerada, ou medindo a dose por meio de uma câmara de ionização no cabeçote de raios X. A velocidade do caminhão deverá ser controlada, pois quanto mais rápido ele atravessar, maior será a pulsação do feixe (pulsação por segundo ou frequência). A norma informa sobre detalhes das especificações técnicas como do alvo, colimador compostos por tungstênio.

Para sistemas CXR-6M, em que utilizam dupla energia de 2 e 6 MeV, a máxima taxa de dose absorvida no ar a 1 m da fonte de raios X é de 0,25 e 0,60 Gy/min, com tempo de irradiação de 0,03 s, onde a dose efetiva, por escaneamento é de 0,15 mSv/scan e 0,30 mSv/scan (e 0,45 mSv/scan, para ambos os feixes). A largura vertical (abertura) do feixe em leque é de 0,0074 rad (0,42°). O cálculo de dose na norma assume de modo conservador,

prevendo as pessoas de pé próximas da parede do contêiner sendo expostas de corpo inteiro. Para um contêiner de 22,6 m de comprimento em uma velocidade de 0,8 m/s, o tempo total de escaneamento é de 28 s. A norma comenta sobre os resultados de KHAN e colaboradores (2004) que mediu com dosímetros OSL sobre um fantoma a dose efetiva de 0,07 e 0,11 mSv por escaneamento para um LINAC de 2 e 6 MeV, respectivamente.

Em 2007, o trabalho de HUPE et al intitulado *X-ray security escâner s for personnel and vehicle control: dose quantities and dose values* representou mais uma pesquisa na área de proteção radiológica com uso de equipamentos de medição radiométrica em inspeção voltado para segurança aeroportuária e controles de fronteira. As quantidades e valores de doses se confrontam com a ideia da exposição dos humanos à radiação ionizante o que aumenta a questão de justificação para a prática.

Neste trabalho de HUPE et al (2007), foi realizado um projeto de pesquisa do Ministério Federal Alemão para o meio ambiente, conservação da natureza e segurança nuclear. Foi medido o equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$ e o equivalente de dose pessoal, $H_p(10)$, para o pessoal que trabalha na prática e operadores de raios X do veículo, usando o método de transmissão e / ou retrodifusão. Para os estudos das medidas dos operadores de raios X, os valores de dose obtidos estão na faixa de 0,07 a 6 mSv.

Os resultados da dose das medidas para os escâneres investigados foram provenientes de diferentes exposições médicas e de situações naturais. Em um escâner de transmissão e de retroespalhamento de veículos, com 450 kV da voltagem e 6,65 mA de corrente, no tubo de raios X, o valor medido $H^*(10)$ foi de 0,4 $\mu\text{Sv}/\text{scan}$. O autor compara ainda que para o caso de radiação cósmica, um voo de Frankfurt para Nova York (com duração de 7 h) resulta em uma dose de cerca de 35 μSv . Isso é muito superior à dose de uma varredura de retrodispersão, que é cerca de 0,1 μSv , ou mesmo maior do que a dose de uma varredura de transmissão que representa cerca de 6 μSv (HUPE et al, 2007).

Em 2012, IVICA PRLIC apresentou estudo científico sobre exposição externa à radiação ionizante durante inspeções radiográficas de carga em veículos (escaneamento alfandegário).

Esse trabalho teve como objetivo investigar a preocupação da segurança e proteção radiológica dos motoristas na condução dos caminhões com cargas inspecionadas pelo feixe de raios X com LINAC de 4,5 MeV, similares em termos de energia aos que foram estudados

nesta tese. Trata-se de trabalho bastante completo em termos de pesquisa, investigação, medição dosimétrica, com vasta exposição de argumentação técnica. O trabalho descreve a motivação para a pesquisa onde os veículos comerciais pesados podem ser varridos várias vezes ao dia na mesma rota e durante a mesma viagem. Esta situação suscitou grande preocupação na indústria dos transportes rodoviários para aquele país com relação à prática de triagem com o uso de raios X, uma vez que muitas vezes, não existem medidas preventivas para proteger os condutores, nem os condutores são orientados através de informações facilmente acessíveis sobre os procedimentos de controle e os possíveis riscos e impactos que as inspeções ionizantes têm sobre a sua saúde (IVICA PRLIC, 2012).

Sendo assim, IVICA PRLIC (2012) investigou os perigos e riscos associados às atividades de transporte que estão inevitavelmente relacionados com a possível exposição dos motoristas e outros funcionários às radiações ionizantes durante o processo de inspeção de cargas e veículos por um período de alguns meses, mediante os níveis de exposição à radiação de raios X em passagens de fronteira e medições da exposição à radiação. Para este estudo, foi usado equipamento de detecção de radiações e dosímetros pessoais, dosímetros eletrônicos ativos, além de registros de todas as práticas e procedimentos relacionados com a varredura com uso de raios X nos postos fronteiriços selecionados.

Os dosímetros foram dispostos em um galão contendo água (fantoma de água) disposta no assento do motorista na cabine do caminhão que conduz a carga inspecionada pelos raios X. Os equipamentos emissores de raios X do estudo de IVICA PRLIC (2012) foram com raios X de energia dupla até 450 keV operando em modo de exposição contínua, energia de 2,5 MeV a 9 MeV trabalhando em modo pulsado até 400 Hz, como o escâner móvel LINAC 4,5 MeV produzido nos EUA, UE, China, Japão. No trabalho, IVICA PRLIC (2012) relatou que o motorista conduz o veículo a baixa velocidade, perto do feixe de raios X “em leque”. O sistema em tela inicia por meio da constante denominada “campo de radiação” que começa automaticamente após a cabine do caminhão passar os indicadores de laser, e isso garante que a cabine, com o motorista dentro, não seja irradiada, mas apenas o reboque / contentor de carga. Este procedimento é semelhante ao escopo da pesquisa desta tese.

O motorista nesse processo de inspeção receberá somente parte do feixe espalhado na interação com a carga. A contribuição excedente, além da radiação de fundo, na cabine do motorista é também proveniente de parte desse feixe espalhado por ocasião da inspeção na carga (IVICA PRLIC, 2012). Os resultados do estudo de campo de IVICA PRLIC (2012) mostraram que os riscos são baixos à saúde e segurança no trabalho para os motoristas com a

inspeção nos caminhões pelos raios X de alta energia do LINAC. Os resultados com medições de um dosímetro após várias digitalizações de um veículo durante uma determinada viagem foram entre 0,2 mSv/h (máximo) e 0,1 μ Sv/h (mínimo). Cada varredura e o tempo correspondente foram gravados. Neste teste o dosímetro eletrônico que representa o motorista estava dentro da cabine do caminhão durante a viagem. O trabalho apresentou que além da radiação de fundo acumulada, os limites aceitáveis de exposição para membros do público recebem menos que 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007). Os limites ocupacionais são definidos para 100 mSv durante um período de cinco anos, onde a média anual é de 20 mSv por ano (ICRP 103, 2007). Assim, a referência de dose ocupacional não será um problema de saúde para os motoristas, que permanecerão classificados como indivíduos do público devido a exposição não atingir o limite de 1 mSv/ano (IVICA PRLIC, 2012).

Em 2015, ONONOGBO e colaboradores apresentaram estudo sobre exposição externa à radiação ionizante durante a prática de inspeção portuária por radiografia. Os autores destacaram que a exposição dos seres humanos a radiação ionizante pode levar a riscos para a saúde, e que se fazia necessário uma avaliação da exposição externa à radiação ionizante durante a prática em condições normais de uso e fora de uso, no porto de Onne, Rivers State (Nigéria). A pesquisa foi realizada para estimar os riscos para a saúde associados a essa exposição. O levantamento radiométrico *in situ* da radiação foi realizado usando dois medidores de radiação bem calibrados (Digilert-50 e Radalart-100) e um Sistema Global de Posicionamento (GPS). A área do porto em estudo foi dividida em quatro zonas. Foram realizadas medidas das taxas de exposição à radiação durante o funcionamento no escaneamento de carga fora de operação.

A taxa média de exposição à radiação de quatro locais durante a operação de varredura foi de $0,018 \pm 0,001$ mR/h a $0,060 \pm 0,0039$ mR/h e os intervalos de taxa de dose equivalente de $1,514 \pm 0,08$ mSv/ano para $5,004 \pm 0,33$ mSv/ano. O autor mediu a taxa de exposição média dos quatro locais da instalação quando o equipamento não estava em funcionamento e este valor variou de $0,015 \pm 0,0024$ mR/hr a $0,018 \pm 0,001$ mR/hr. A taxa de dose equivalente variou de $1,29 \pm 0,09$ mSv/ano a $1,49 \pm 0,09$ mSv/ano.

A taxa média de exposição obtidos para cada local da área de estudo, incluindo os blocos do escritório, estão acima do valor seguro recomendado para indivíduo do público de 0,013 mR/h e 1,0 mSv/ano, respectivamente. Os resultados obtidos mostraram que a radiação ionizante de fundo da área foi afetada devido à operação de varredura de carga. O trabalho

não descreveu informações técnicas dos equipamentos da instalação onde ocorreu o levantamento radiométrico.

Em 2013 no trabalho realizado por (Rogério S. Gomes et al.) com o tema Dose aos Motoristas Durante a Varredura de Carga Usando a Simulação Monte Carlo, apresenta resultados das doses médias absorvidas pelo motorista, e incertezas estatísticas associadas, por varredura para diferentes órgãos, levando em consideração as diferentes energias de feixe de elétrons e diferentes tipos de carga transportada (sem carga (vazia), água e ferro).

O trabalho também apresenta as doses estimadas absorvidas pelo motorista devido a uma falha do sistema de segurança, produzindo uma exposição do motorista ao feixe direto. Os resultados de simulação apontam que a dose aos motoristas depende fortemente do tipo de carga transportada. Isto deve-se enfatizar que a dose para os motoristas também pode ser afetada pela forma como a carga é distribuída no contêiner. As estimativas preliminares da dose de corpo inteiro são 0,250 μGy (4,5 MeV) e 0,600 μGy (6,0 e 9,0 MeV) por varredura para a configuração simulada. Em condições de acidente, quando a cabine está exposta ao feixe primário, um a dose estimada de corpo inteiro foi calculada em aproximadamente 0,1 mGy para todos os elétrons.

Em 2019, conforme Estudo sobre Dosimetria de Radiação e Radioproteção Aplicado à Atividade de Inspeção de Carga Portuária, de (Renato G. Gomes et al., 2019). Apresenta a avaliação da dose na cabine do caminhão realizada com a presença do motorista que transporta a carga a ser inspecionada. O trabalho relata que a medição foi realizada em uma operação normal de rotina do caminhão. A radiação medida na cabine é proveniente do espalhamento, não do feixe direto para inspeção da carga para geração de imagens. Foram feitas medições no sala de operação, onde ficam os trabalhadores responsáveis pela operação do sistema de inspeção de contêineres.

Foi realizada uma medição em área livre, após as barreiras de concreto. O acelerador linear empregado na operação de pós-inspeção é fixo e operação no modo portal, SMITHS HEIMANN com 4,5 MeV. A exposição na cabine de operação para dois terminais foram de: 0,04 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$ e 0,05 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$. Radiação secundária na cabine do caminhão para dois terminais foram de: 3,03 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$ e 3,51 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$. Exposição na entrada de inspeção do canal para dois terminais foram de: 0,70 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$ e 0,50 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$. Exposição na saída de inspeção do canal para dois terminais foram de: 0,05 $\mu\text{Sv/h} \pm 10\%$ e 0,50 $\mu\text{Sv/h} \pm$

10%. Exposição na área livre atrás da barreira de concreto para os dois terminais: $0,03 \mu\text{Sv/h} \pm 10\%$ e $0,03 \mu\text{Sv/h} \pm 10\%$.

No trabalho de tese (Renato G. Gomes, 2020) com o tema: Modelagem computacional de acelerador linear e de instalação de inspeção de bagagem e contêiner. Descreve o desenvolvimento de um sistema de Inspeção de Bagagem e Contêiner utilizando modelagem computacional com o código MCNPX. Os resultados mostram que a partir do maior valor estimado de $0,00547 \text{ mSv/min}$ para a contribuição da radiação espalhada pela carga na taxa de equivalente dose ambiente na cabine do caminhão, ao longo de 12 m de extensão do contêiner o escâner levará 2,88seg com a velocidade do caminhão no canal de inspeção em 15 km/h (4,2 m/s). Para todo o percurso do contêiner no processo de inspeção, o somatório da taxa de dose será $0,263\mu\text{Sv}$ na cabine.

Os resultados mostraram que o valor calculado se encontra abaixo do limite negligenciável, conforme previsto na Posição Regulatória 3.01/001/2011, que é de $10\mu\text{Sv}$. O valor calculado foi de $0,263\mu\text{Sv/escaneamento}$ provocado pela radiação espalhada na carga. Os resultados mostraram que o motorista para ser mantido dentro dos limites admissíveis de dose para indivíduo do público, que é de 1 mSv/ano , poderá conduzir o caminhão 3808 vezes por ano (15 vezes ao dia), considerando o turno diário em 8 horas, para 250 dias por ano (2000 h/anuais).

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3. Sistema de Proteção Radiológica em Inspeção de Segurança de Carga e Contêineres

3.1. Objetivo e Eficácia da Proteção Radiológica na Prática de Inspeção de Segurança

Conforme Guia de Licenciamento de Instalações de Inspeção de Bagagem e Contêineres da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, o serviço que utiliza equipamento gerador de radiação ionizante para fins deve implementar um projeto denominado Programa de Proteção Radiológica (PPR). Este deve contemplar, no mínimo, medidas de prevenção, de controle e de vigilância e monitoramento, para garantir a segurança e a qualidade dos procedimentos radiológicos. Entretanto, para que um PPR seja adequadamente planejado, construído, aplicado e auditado, é necessário compreender toda a complexidade da proteção radiológica, sobretudo quando aplicada aos ambientes e procedimentos de inspeções de contêineres.

Conforme exposto, todo sistema de inspeção de escaneamento de contêineres e veículos precisa implementar um Programa de Proteção Radiológica (PPR). Para tal programa deve se levar em conta que o objetivo da proteção radiológica é estabelecer os requisitos básicos para a proteção contra os riscos associados a exposição por equipamentos geradores de radiação ionizante (na prática referida acelerador de partículas), proporcionando um padrão apropriado de proteção ao indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE), ao público, ao meio ambiente, sem limitar indevidamente os benefícios criados pela aplicação dos raios X (BRASIL, 2014).

O uso adequado dos equipamentos, o avanço de novas tecnologias em sistemas de controle na cultura de segurança e os treinamentos periódicos dos profissionais são de extrema importância para o compromisso com a segurança de todos. Desta forma, a eficácia da proteção radiológica está relacionada ao controle de equipamento gerador de radiação ionizante (que dá origem a doses individuais).



Figura 1: Um equipamento dá origem a doses individuais de diferentes indivíduos (imagem própria)

Em todas as instalações que utilizam a prática de inspeção de segurança com raios X, é obrigatório um sistema de proteção radiológica que esteja em conformidade com as normas estabelecidas pelo órgão regulador da prática, onde determinações de segurança são providas para a segurança e a saúde do pessoal operacional e do público. Como se pode verificar em SILVA FILHO (2020):

[...] a delimitação de área e levantamento radiométrico, que consiste por uma avaliação das taxas de exposição nas áreas controladas, supervisionadas e livres, em pontos pré-estabelecidos pelo Plano de Proteção Radiológica (PPR) da instalação, o qual deve ser realizado rotineiramente. As medições do levantamento radiométrico (LR) devem ser comparadas com os limites de doses preconizados no arcabouço legal nacional, a fim de que seja garantido os parâmetros corretos de proteção radiológica visando reduzir os riscos biológicos a saúde dos indivíduos ocupacionalmente expostos (operadores do escâner) e indivíduos do público (motoristas condutores dos veículos inspecionados). As taxas de dose nas áreas de segurança são obtidas por meio da realização do LR com instrumentação nuclear adequada e compatível com o tipo, energia e nível de radiação medido (SILVA FILHO, 2020).

3.2. Bases Científicas na Proteção Radiológica em Serviços de Inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres

De acordo com Dicionário Aurélio, ciência é definido como:

“Reunião dos saberes organizados obtidos por observação, pesquisa ou pela demonstração de certos acontecimentos, fatos, fenômenos, sendo sistematizados por métodos ou de maneira racional: as normas da ciência.”
Fonte: <https://www.dicio.com.br/ciencia/> acesso em: 20 de Março de 2020.

Quando se pensa em ciência na área de inspeção de segurança com uso de raios X, trata de pesquisas que proporcionam conhecimentos de matemática, física, química, biologia, computação, entre outros. A ciência é favorável para desenvolvimento de novas tecnologias, normas e regulamentações na prática de inspeção de segurança. Ela permite que forme um conhecimento profundo sobre a radiação eletromagnética ionizante e fatores associados aos procedimentos de geração de imagem, com a utilização do menor tempo de exposição possível, maior distância permitida e blindagem adequada. A gama e importância da prática, já mencionada anteriormente, torna fundamental que, em proteção radiológica, os fenômenos físicos sejam representados através de grandezas e unidades estabelecidas de forma clara. Isso gera uma comunicação eficaz, utilizando técnicas e instrumentos de medição de radiação que devem ser padronizados para um ótimo desempenho.

Tamanho é a importância da ciência para o ramo da proteção radiológica, que agências e instituições diversas foram fundadas em todo o mundo para fomentar a pesquisa aplicada e/ou regular as práticas sempre pautadas em bases científicas. Isso é de extrema importância para proporcionar um nível adequado de segurança nas exposições ocupacionais e exposições do público durante o uso dos equipamentos geradores de radiação ionizante, como o acelerador de partícula. Todos os conceitos adiante estudados somente existem em função do estabelecimento da proteção radiológica descrita como ciência aplicada, balizada por outras ciências básicas.

3.3. Estrutura Conceitual da Proteção Radiológica na Prática de Inspeção de Segurança

Os equipamentos projetados para realizar o escaneamento de carga em um local fixo, requer a construção de uma infraestrutura com delimitação de área por barreiras fixas, com projeto aprovado pelo órgão regulador no Brasil a Comissão Nacional de Energia Nuclear (BRASIL, 2020). A regulamentação e requisitos técnicos para controle e segurança dos operadores e profissionais envolvidos no sistema de inspeção de cargas e contêineres, depende de uma estrutura conceitual de proteção radiológica, com o objetivo de fornecer informações que sejam úteis em tomada de decisões e avaliações por parte dos profissionais que atuam diretamente e indiretamente com o escâner de inspeção de segurança com uso de raios X e usuários em geral. Assim, o modo como alguma coisa é construída, organizada ou está disposta é importante nos licenciamentos, controle, avaliação, fiscalização, regulamentação e normatização das instalações, independentemente do uso (BRASIL, 2015).

Os sistemas de inspeções de imagens de carga destinam-se, geralmente, a identificarem práticas ilegais, como tráfico de armas, explosivos, drogas, contrabando de mercadorias, combate a evasão fiscal e, até tráfico de seres humanos (SILVA FILHO, 2020). Mesmo entendendo os benefícios em todo o mundo muitas pessoas têm medo dos efeitos potencialmente danosos dessa radiação ionizante. Indivíduos ocupacionalmente expostos e do público, por exemplo, preocupam-se em como podem ser afetados sua saúde e cotidiano. Nesse contexto, avaliar os riscos e os benefícios constitui o aspecto chave para a aceitação pela sociedade, tornando fundamental uma estrutura de normatização e fiscalização para a prática de inspeção de segurança.

O objetivo conceitual da estrutura de normatização e fiscalização de proteção radiológica é proporcionar parâmetros às instalações e práticas que manuseiam, que atua na produção, na posse e na utilização de fontes, bem como o transporte, armazenamento, deposição de materiais radioativos e equipamentos geradores de radiação ionizante, abrangendo todas as atividades relacionadas que envolvam ou possam envolver exposição à radiação, visando estabelecer ou melhorar infraestruturas no tocante à radioproteção (BRASIL, 2014). Isso é balizado através da implantação e manutenção do cumprimento aos requisitos constantes nas normas e guias estabelecida pela Comissão Nacional de Energia

Nuclear (CNEN) que é a Agência Reguladora. A CNEN, autarquia federal, criada pela Lei nº 4.118/62, de 27 de agosto de 1962, vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, com autonomia administrativa e financeira, dotada de personalidade jurídica de direito público, com sede e foro na cidade do Rio de Janeiro.



Figura 2: Agência Nacional Reguladora em Proteção Radiológica - [Comissão Nacional de Energia Nuclear \(www.gov.br\)](http://www.gov.br).

As Agências Reguladoras (AR) são criadas por leis e são órgãos governamentais que exercem o papel de fiscalização, regulamentação e controle. São de interesse público e tem a natureza de autarquia. O propósito primário da CNEN no campo da radioproteção é proporcionar um nível adequado de proteção e segurança radiológicas para os seres humanos. Isso deve ser alcançado sem reduzir os benefícios da prática que origina a exposição à radiação ionizante, evitando a ocorrências de efeitos biológicos indesejavelmente radioinduzidos. (BRASIL, 2014) É necessário garantir que as doses radiológicas estejam mantidas abaixo do limite pertinente e que sejam adotadas todas as medidas razoáveis para minimizar a ocorrência de efeitos futuros na população. (ICRP-103, 2007).

Com isso, existe uma clara separação entre as funções da autoridade reguladora e as de agências governamentais ou organizações responsáveis por desenvolvimento e promoção das práticas reguladas. (MESQUITA, 2005) Para alcançar tal finalidade, a legislação brasileira deve especificar as responsabilidades e funções, estabelecendo o financiamento da AR, com independência efetiva para o controle da segurança com equipamentos geradores de radiação ionizante no que diz respeito a prática de inspeção de segurança com uso de raios X. Deve ser fornecido poderes e recursos para que tal organismo atinja as metas atribuídas. (ICRP, 2008) Cabe à Autoridade Reguladora cooperar com outras autoridades pertinentes, assessorando e proporcionando informações de segurança, como por exemplo: Ministério da Saúde,

autoridades governamentais locais, forças armadas, autoridades educacionais, autoridades de alfândega etc.

A Autoridade Reguladora também deve ter mecanismos de acordos bilaterais e multilaterais a nível internacional, (BRASIL, 2004) bem como desenvolver princípios e critérios de segurança, estabelecendo regulamentos e guias. Espera-se que mantenha um programa regulador, que deverá incluir a preparação de regulamentação, implementação de procedimentos para a notificação e autorização de instalações que utilizam equipamentos geradores de radiação ionizante, como é o caso dos aceleradores de partículas.

A Autoridade Reguladora está facultada a entrar em locais ou instalações em qualquer momento para realizar inspeções, auditando documentos pertinentes e fazendo cumprir os requisitos reguladores, comunicando-se diretamente com as autoridades de governo. (BRASIL, 2020; BRASIL, 1988)

3.4. Principais Organizações Internacionais

Para ajudar as agências regulatórias e de consultoria a nível nacional e internacional, fornecendo principalmente orientações sobre os princípios fundamentais em que a proteção radiológica pode basear-se, tem a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiation Protection*, ou, simplesmente, ICRP), vinculada a Agência Internacional de Energia Nuclear (*International Atomic Energy Agency*, IAEA), que foi estabelecida como uma organização autônoma no seio da Organização das Nações Unidas (ONU). A IAEA tem como função estabelecer ou adotar, em consulta e, quando apropriado, em colaboração com os órgãos competentes das Nações Unidas e com as agências especializadas de interesse, as normas de segurança para a proteção da saúde. Servindo como principal fórum mundial intergovernamental de cooperação técnico-científica para estabelecer os requisitos básicos para a proteção contra os riscos associados à exposição à radiação ionizante, bem como para a segurança das fontes de radiação que podem proporcionar essa exposição, seis organizações internacionais são importantes para esse fim. São elas: (FAO - *Food and Agricultural Organization*; IAEA; ILO - *International Labour Organization*; OECD/NEA - *Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Cooperation and*

Development; e PAHO - *Pan American Health Organization*, WHO - *World Health Organization*). Todos esses organismos desenvolveram, em conjunto, os padrões básicos internacionais para a proteção radiológica e para a segurança de fontes de radiação, chamados *International Basic Safety Standards for Protection against Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, ou, simplesmente, BSS. (IAEA, 2014).

A ICRP é um órgão consultivo que apresenta recomendações e orientações de proteção radiológica fundado em 1928 pela Sociedade Internacional de Radiologia (*International Society of Radiology*, ISR). Na elaboração das recomendações, a ICRP considera os princípios fundamentais e bases quantitativas sobre as medidas de proteção radiológica que podem ser estabelecidas, deixando para as autoridades regulatórias nacionais a responsabilidade de formular os pareceres específicos, códigos de conduta ou regulamentos que melhor se adequam às necessidades de seus países. (ICRP -103, 2007)

Tabela 1: Relação de Recomendações ICRP e Normas Básicas da IAEA

RECOMENDAÇÕES ICRP	IAEA NORMAS BÁSICAS
1958 – <i>Publication 1</i>	1962
1966 – <i>Publication 9</i>	1967
1977 – <i>Publication 26</i>	1982
1990 – <i>Publication 60</i>	1996
2007 – <i>Publication 103</i>	2011

A Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (*International Commission on Radiation Units and Measurements*, ICRU) foi fundada em 1925 no Congresso Internacional de Radiologia. Desde a sua criação, teve como principal objetivo o desenvolvimento de recomendações internacionalmente aceitáveis sobre grandezas e unidades de radiação e radioatividade, procedimentos adequados para a medição e aplicação destas grandezas em radiodiagnóstico, radioterapia, biologia da radiação, e operações industriais. A ICRP e ICRU não tem poder formal para impor a implementação das suas recomendações. Porém, a legislação da maioria dos países segue as recomendações desses importantes órgãos.



Figura 3: Organizações Internacionais ICRP e ICRU.

Em 1955 a Assembleia Geral das Nações Unidas estabeleceu, pela Resolução 913, o Comitê Científico das Nações Unidas para Efeitos da Radiação Atômica (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, UNSCEAR), responsável por avaliar e divulgar os seus resultados sobre os efeitos à saúde e ao meio ambiente causados pela exposição à radiação. (UNSCEAR, 2019). Governos e organizações em todo o mundo confiam nas estimativas realizadas pelo UNSCEAR, com embasamento científico para avaliação dos riscos de radiação, para o desenvolvimento de normas de proteção radiológica, bem como para a segurança e regulamentação de fontes de radiação.



Figura 4: Símbolo da Organização Internacional UNSCER.

Essas organizações internacionais realizam reuniões e programas de treinamento, criam e distribuem documentos para aplicação dos princípios de radioproteção. Assim, as agências reguladoras em cada país adotam as políticas e as adaptam a cada situação.

3.5. Quadro Estrutural do Sistema de Proteção Radiológica

Atualmente, no Brasil, existem diversas instalações devidamente autorizadas que utilizam os aceleradores lineares para a prática de inspeção de bagagem e contêineres. Com tantas instalações radiativas com tal finalidade, a CNEN, em 2015, lança o Guia de

Licenciamento de Instalações De Inspeção de Bagagem e Contêineres, o qual se inicia com a indicação de seus desideratos:

A Norma da CNEN-NN-6.02, de 2022, dispõe sobre o licenciamento de instalações radiativas que utilizam fontes seladas, fontes não seladas, equipamentos geradores de radiação ionizante e instalações radiativas produtoras de radioisótopos. A referida Resolução apresenta a classificação das instalações radiativas, atos administrativos e requerimentos necessários para o licenciamento e critérios de isenção. No entanto, a Resolução não descreve os parâmetros e critérios técnicos que devem ser observados e avaliados a partir da documentação apresentada pelo requerente para o licenciamento de uma instalação de Inspeção de Bagagem e Contêineres que não atendam aos requisitos de isenção de proteção radiológica. Neste guia estão relacionados os aspectos que devem ser avaliados durante o processo de licenciamento antes que seja emitido cada ato administrativo, assim como as recomendações necessárias para que se cumpra com cada requisito (GUIA CNEN,2023).

Como o próprio texto regulador indica, no bojo da Resolução CNEM-NN-6.02 não é possível visualizar a descrição de parâmetros e critérios técnicos, residindo aí uma lacuna que precisava ser preenchida, fosse por outra resolução, fosse pela produção acadêmica ou, como parece mais adequado, por ambas as vias. Com o fim de suprir a deficiência citada, o Guia de Licenciamento surge para delimitar ações para a elaboração de procedimentos operacionais padrões devidamente seguros. (SILVA FILHO, 2020)

Assim, o Plano de Proteção Radiológica da Instalação deve, segundo prevê o Guia, partir da análise de pontos pelos quais o administrador possa agir sem prejuízo da segurança daqueles que fazem uso do espaço. Nesse sentido, preza-se por uma avaliação de segurança sempre completa, a qual o quadro estrutural do sistema de proteção radiológica deva conter:

- Sistema de Registro de Identificação;

Descrição da empresa proprietária do equipamento, incluindo nome da instalação, número do CNPJ, endereço, nome do responsável legal, principal atividade e justificativa para utilização de radiação ionizante;

Caso a pessoa jurídica proprietária do Equipamento de Inspeção de Bagagem e Contêineres opte pela contratação de uma empresa terceirizada para se responsabilizar pela operação e administração do serviço de Proteção Radiológica, é necessário que seja acrescentado no plano a descrição desta empresa. Devem ser fornecidos, no mínimo, os seguintes dados: nome da instalação, número do CNPJ, matrícula na CNEN, endereço e nome do responsável legal; Caso a pessoa jurídica proprietária do

Equipamento de Inspeção de Bagagem e Contêineres opte pela contratação de uma empresa terceirizada para realizar a manutenção do equipamento, é necessário que seja acrescentado também no plano a descrição desta empresa. Devem ser fornecidos, no mínimo, os seguintes dados: nome da instalação, número de CNPJ, matrícula na CNEN, endereço e nome do responsável legal; (GUIA CNEN, 2023)

Descrição do pessoal envolvido na prática (operadores, supervisores e demais funcionários);

*A CNEN solicita que todas as instalações de Inspeção de Carga e Contêiner possuam no mínimo 02 (dois) Supervisores de Proteção Radiológica, na área específica de atuação, conforme Norma CNEN-NN-7.01. Em caráter transitório, a instalação poderá possuir 01 (um) Supervisor de Proteção Radiológica certificado na área de **Gamagrafia industrial e radiografia industrial com equipamentos geradores de raios X ($V > 600$ kV)** e 01 (um) certificado na área de **Acelerador de Partículas**.*

Quanto aos operadores, para Escâneres fixos que solicitam Autorização para Construção e que possuem a limitação de área feita por grades ou muros fixos, são recomendados no mínimo 02 (dois) operadores por turno de funcionamento do Equipamento. Para Escâneres não-fixos e que possuem a limitação de área feita por cones ou correntes móveis, são recomendados no mínimo 03 (três) operadores por turno de funcionamento do Equipamento. (GUIA CNEN, 2023)

Descrição do Escâner;

Devem ser fornecidos, no mínimo, os seguintes dados: nome do Fabricante, Modelo, Número de Série, Energia, Tipo e Modo de operação; (GUIA CNEN, 2023)

Descrição da fonte de aferição ou fonte teste;

Fonte de radiação empregada para a aferição de instrumentos de medição de radiações ionizantes. (CNEN NE 3.02, 2018)

- Sistema de proteção física e sinalização

Sistema de proteção como: blindagem, cerca, balizamento, controle de acesso, delimitação de área e placas;

As áreas controladas e supervisionadas da instalação, com descrição detalhada da sinalização e uso de símbolos de advertência apropriados, assim como controles de acesso; (GUIA CNEN, 2023)

- Sistema de segurança com intertravamento

Estimulando a cultura de segurança (redundância, diversidade e independência) dos dispositivos;

Descrição detalhada dos sistemas de segurança, que devem considerar os critérios de independência, redundância e diversidade.

Descrição do funcionamento dos sistemas de segurança, considerando que quaisquer defeitos nesses componentes devem impedir o funcionamento do escâner e sistemas associados, até que o defeito seja consertado. A documentação apresentada deve descrever todos os sistemas de segurança com os detalhes de suas lógicas de funcionamento e localização. (GUIA CNEN, 2023)

- Sistema de monitoração de radiação

Com instrumentos adequados;

A CNEN solicita que a instalação possua, no mínimo, 02 (dois) medidores de radiação portáteis permanentes. Esses medidores não podem ser substituídos por medidores de radiação fixos de área ou monitores de radiação do tipo Bip.(GUIA CNEN, 2023)

Calibração dos medidores de radiação, especificando a periodicidade de realização do mesmo; (GUIA CNEN, 2023)

A monitoração individual dos trabalhadores e levantamentos radiométricos periódicos, incluindo a medição da dose na cabine do motorista. Estabelecer níveis de investigação e ações a tomar quando esses níveis são excedidos; (GUIA CNEN, 2023)

- Sistema de Regulamentações

Com normas de segurança durante a operação e manutenção, medidas de emergências para incidentes e acidentes. Tendo um sistema de regulamentações com referência exposições ocupacionais e do público de acordo com o princípio ALARA;

As regras locais a serem seguidas pelos operadores (procedimento de trabalho, etc). (GUIA CNEN, 2023)

A previsão de realização de exames médicos nos trabalhadores, especificando a periodicidade de realização. (GUIA CNEN, 2023)

Os métodos que serão adotados para auditar o Serviço de Proteção Radiológica e sua periodicidade. A CNEN solicita que este tipo de instalação seja auditado, no mínimo, a cada três meses. (GUIA CNEN, 2023)

Descrição dos cenários de exposição para os trabalhadores e público, em operação normal. (GUIA CNEN, 2023)

Descrição das barreiras de segurança para cada cenário de exposição. (GUIA CNEN, 2023)

Avaliação de dose dos trabalhadores e do público, para cenários operacionais normais e situações incidentais/acidentais, tendo em vista as barreiras de segurança existentes, os limites e as condições operacionais e os fatores de ocupação. (GUIA CNEN, 2023)

Descrição dos cenários de exposição para os trabalhadores e público, em situações incidentais/acidentais, com a identificação dos eventos iniciadores. (GUIA CNEN, 2023)

Local de guarda dos monitores individuais, condição de uso, troca, periodicidade de leitura, registro e procedimento de comunicação aos trabalhadores. (GUIA CNEN, 2023)

Procedimento de aferição dos medidores de radiação, periodicidade de realização, avaliação e registro. (GUIA CNEN, 2023)

Local onde estarão afixados os telefones de emergência dos supervisores de proteção radiológica. (GUIA CNEN, 2023)

Previsão de comunicação imediata à CNEN e envio de relatório com descrição detalhada da ocorrência, bem como dos procedimentos seguidos para contornar a situação. (GUIA CNEN, 2023)

Programa de testes dos sistemas de segurança. Este programa deverá conter: descrição de cada um dos testes realizados, frequência de realização de cada teste, critério de aceitação do teste, pessoal envolvido no teste, ficha de registro do teste assinado pela pessoa que realizou e o responsável técnico. (GUIA CNEN, 2023)

Deve ser apresentado um programa de manutenção do Escâner que contemple: Cronogramas de manutenção e revisões periódicas; Especificações das operações a serem realizadas por pessoal da instalação e pelo fabricante ou representante; e Ficha de registro do teste assinado pelo profissional que realizou. (GUIA CNEN, 2023)

- **Sistema de treinamento**

Treinamento de pessoal (operadores, supervisores de proteção radiológica, pessoal da manutenção e outros profissionais aplicáveis).

Deve ser assegurado que existe um programa de treinamento e capacitação dos trabalhadores que contemple os seguintes aspectos: Proteção Radiológica; Informação sobre os riscos para a saúde, derivados da exposição ocupacional;

Instruções a respeito do impacto das ações dos trabalhadores nas condições de segurança e proteção radiológica; Informações, instruções e capacitação a respeito dos procedimentos de emergência; e Informação sobre os aspectos relacionados à operação do Escâner e manipulação dos demais equipamentos do Serviço de Proteção Radiológica; Previsão de mecanismos para a educação continuada, registros dos treinamentos recebidos por cada trabalhador, incluindo uma comprovação de aproveitamento; Postulação de

intervalos regulares para a capacitação de cada trabalhador; Revisão periódica dos programas de capacitação, para garantir que estejam sempre atualizados.

Para os operadores, a carga horária mínima inicial de treinamento exigida é 80h. (GUIA CNEN, 2023)

Existirão recursos humanos suficientes, com capacitação na área de proteção radiológica e segurança, de acordo com os critérios da Autoridade Reguladora, prevendo-se atividades periódicas de retreinamento para assegurar o nível de competência necessário. (GUIA CNEN, 2023)

- **Sistema Operacional**

Devem ser apresentadas as instruções e os procedimentos operacionais que serão adotados para operação do escâner; (GUIA CNEN, 2023)

3.6. Medidas de Proteção Radiológica do Sistema de Inspeção de Cargas e Contêineres

Os aceleradores de partículas para inspeção de segurança, produz feixe de Raios X com alto poder de penetração. Estas instalações apresentam como medidas de proteção radiológica, blindagem, colimadores, paredes de concreto, cercas, sistema de intertravamento de segurança, controle de procedimentos, monitores de radiação e outros requisitos. Cabe ressaltar que os fótons de raios X, não podem ser gerados a menos que o acelerador esteja energizado. Assim, sem a passagem de energia elétrica para energizar o acelerador, os trabalhadores podem entrar em todos os locais com segurança enquanto o sistema estiver desligado.

3.6.1. Colimador de Chumbo

Quando um feixe de raios X interage com o material atenuador (conhecido como blindagem), a intensidade do feixe se reduzirá conforme a densidade do material, conforme o número atômico deste, sua espessura e a energia do feixe. Os fótons de Raios X primários somente devem atravessar a fenda estreita do colimador de chumbo na direção do detector. E sua função é colimar os fótons de Raios X (estreitar o feixe) de alta energia e atenuar os fótons de Raios X de baixa energia. (GROFF, 2017)



Figura 5: Colimador de Chumbo, parte frontal.



Figura 6: Colimador de Chumbo - parte interna.

3.6.2. Blocos de Blindagem atrás dos Braços do Detector.

Os blocos de blindagem atrás do braço vertical do detector são usados para atenuar o feixe de Raios – X primários que penetram no detector.



Figura 7: Bloco de Blindagem Atrás dos Braços do Detector.

3.6.3. Parede de Blindagem

A parede de blindagem do sistema (figura 8) tem como objetivo assegurar que o nível de radiação fora da área controlada esteja no nível da radiação de fundo ou background.



Figura 8: Exemplo de parede de blindagem em instalação de cargas e contêineres.



Figura 9: Exemplo de parede de blindagem em outra instalação de cargas e contêineres.



Parede para atenuação dos fótons de Raios X

Figura 10: Parede de Blindagem Parte Externa do exemplo da Figura 9.

3.6.3.1. Radiação de Fundo (Background)

No mundo onde a radiação naturalmente existe em todos os lugares, essa radiação é conhecida como “radiação de fundo”, ou pelo simples termo inglês *background*, por vezes abreviado como “BG”. Para compreender melhor o conceito de BG, é importante entender sobre radioatividade natural, ainda que os mecanismos de radioatividade sejam relevantemente diferentes dos de produção de raios X.

A radioatividade ocorre quando núcleos instáveis buscam a estabilidade liberando partículas ou onda eletromagnética para o meio. Esse fenômeno acontece de forma espontânea através dos decaimentos radioativos. A radioatividade pode ser natural ou artificial, mas nesta abordagem está sendo considerada a radioatividade natural que irá gerar a radiação de fundo. Esse fenômeno natural envolve fontes de radiação que são características do meio ambiente e até de nosso organismo. São exemplos o radônio-222 (^{222}Rn), o bismuto-212 (^{212}Bi), o

carbono-14 (^{14}C), o hidrogênio-3 (^3H), o potássio-40 (^{40}K), o sódio-22 (^{22}Na) e outros elementos instáveis que irão liberar radiação de forma espontânea. (IAEA, 1999)

Em suma, toda essa radioatividade natural e a radiação cósmica proporcionam uma taxa de dose para todos os seres vivos. E é nisso que consiste a radiação de fundo, *background* ou BG.

3.6.4. Dispositivos de Intertravamento de Segurança Eletrônico - “interlock”.

A Cultura de Segurança é um conjunto de características e atitudes em organizações e indivíduos, como uma prioridade absoluta a atenção na segurança. Aplicando requisitos para atingir um perfil de cultura de segurança nas instalações radiativas. (IAEA Nº 75, 1991)

O conceito deve ser aplicado em todas as atividades de segurança, seja na organização, procedimento ou projeto, para assegurar que as atividades estejam cobertas por uma série de provisões de modo que, se uma falha ocorrer será compensada ou corrigida. Devem ser providenciados, no projeto da instituição, múltiplos níveis de proteção, em termos de equipamentos e procedimentos, para que seja mínima a necessidade de intervenção humana, de modo a prevenir os acidentes e atenuar suas consequências. (IAEA Nº 75, 1991)

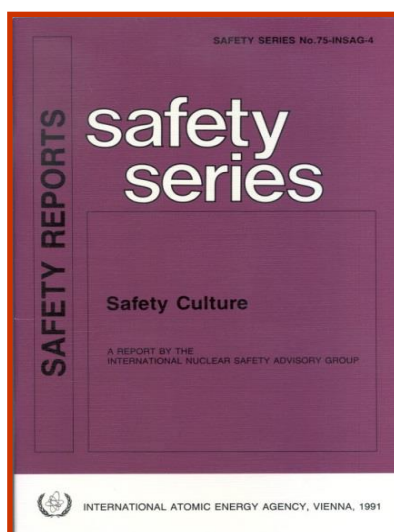


Figura 11: Safety Culture.

A série de Segurança número 75 (IAEA N° 75, 1991) mostrado acima tende a se concentrar na segurança relacionada com usinas nucleares. No entanto, os conceitos são aplicáveis a maioria das atividades que envolvem o uso de fonte emissora de radiação ionizante.

Os dispositivos de intertravamento de segurança eletrônico estão diretamente relacionados a cultura de segurança da instalação de inspeção de bagagens e contêineres com Raios X e incluem botões de emergência, porta chaves, dispositivos de advertência e alarme, equipamentos de monitoração e comunicação.

Sistema de segurança com “interlock” segue as recomendações internacionais quanto à redundância, diversidade e independência. Incluem botões de emergência, chaves de “interlock”, portas com “interlock”, microchaves (micro-switches), dispositivos de alarme e advertência e equipamentos de comunicação. (GROFF, 2017)

3.6.4.1. Dispositivo de Parada de Emergência e Sistema de Segurança com “interlock”.

Os botões de emergência (botoeiras de emergência) são colocados na área externa da cabine do acelerador, no console de controle do acelerador, na cabine do acelerador, no painel do modulador, na caixa principal do acelerador. Também é necessário o uso de cordas de acionamento de emergência que é colocado nos dois lados da pista onde ocorre o escaneamento.

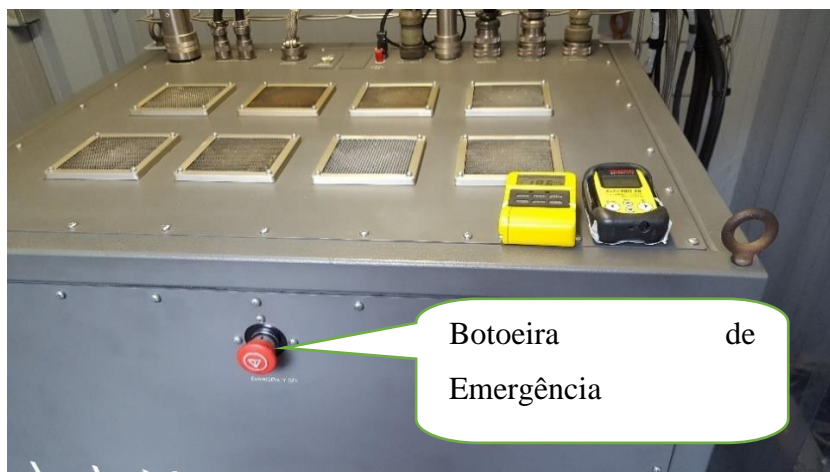


Figura 12: Botoeira de emergência no modulador.

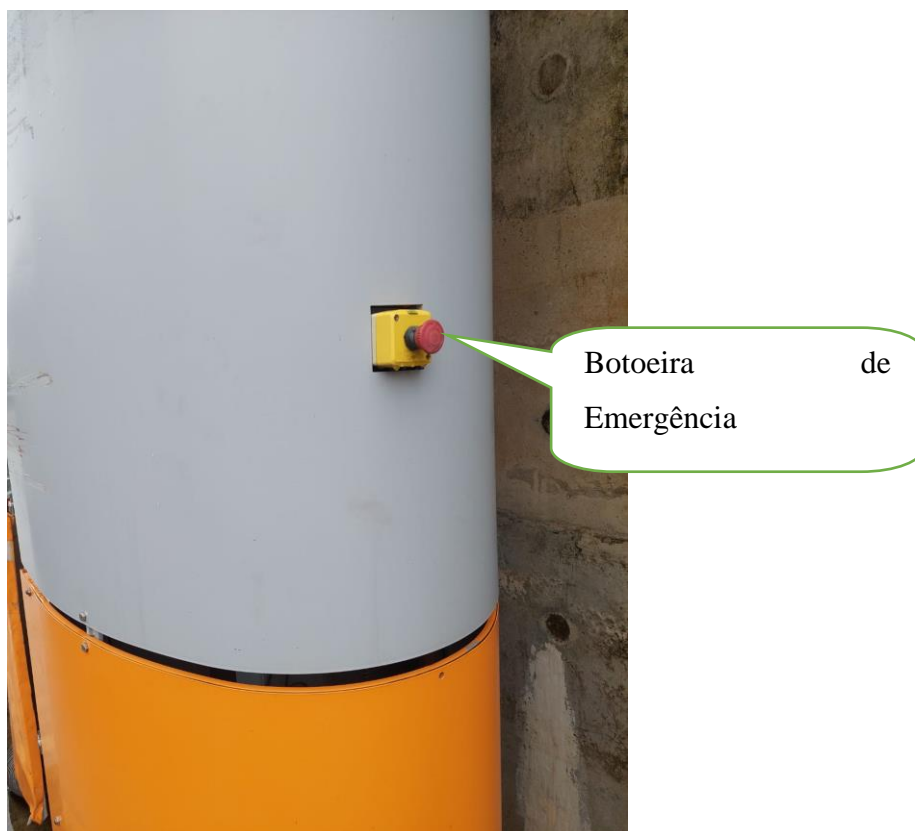


Figura 13: Botoeira de emergência colocado ao lado do sistema de detecção dos fótons, para um tipo de instalação.



Figura 14: Botoeira de emergência no console do painel de comando para um tipo de instalação.

Sistema de segurança com “interlock” precisa seguir as recomendações da CNEN apresentada no Guia, como condições necessárias para que se promova uma cultura de segurança. Considerando os critérios de independência, redundância e diversidade. Além disso, quaisquer defeitos nesses componentes devem impedir o funcionamento do escâner e sistemas associados, até que o defeito seja consertado. (GUIA CNEN, 2023)

Incluem no sistema de segurança, chaves de “interlock” ou chave do console de controle do acelerador, acoplado a um medidor de radiação portátil sendo mantido juntos.



Figura 15: Chave do Controle do Acelerador.

3.6.4.2. Indicador de Advertência, Equipamento de Monitoração e Comunicação.

Nas instalações de inspeção de bagagens e contêineres, dois conjuntos de som e luzes indicadoras de advertência são instalados. Os indicadores de advertência usam luzes vermelha e verde e o som para indicar o estado do sistema. A luz verde acende quando o sistema está pronto para ocorrer o escaneamento (acesso livre para a entrada do caminhão) e a luz vermelha e o som de advertência permanecem ativos durante o escaneamento. A sinalização luminosa vermelha deve ser acionada durante os procedimentos de escaneamento, indicando que vai ocorrer exposição à radiação, devendo ainda ser visível e estar na face externa da entrada e no portal. Lembrando que quando a luz vermelha estiver acesa, a entrada é proibida. (GROFF, 2017)



Figura 16: Sinalização: Entrada Permitida.



Figura 17: Sinalização: Indicativo de Entrada Proibido.

Outro indicador de advertência são as placas de indicação de área controlada e são fixadas ao redor da área de proteção. Estas instalações necessitam de uma política de segurança bem aplicada a proteção radiológica. A sinalização é obrigatória em instalações com uso de radiação ionizante, nada mais é do que um conjunto de estímulo visual com o objetivo de informar e orientar. Desta forma todas as instalações de inspeção de segurança com uso de Raios X, contêm um símbolo “trifólio”, sinalizando que o local tem um equipamento emissor de radiação ionizante.



Figura 18: Sinalização com placas e advertência.



Figura 19: Sinalização com placas para outro tipo de instalação de cargas e contêineres.

Os dispositivos de monitoração e comunicação são importantes para a cultura de segurança nas instalações e são colocados na parte de cima do portal, no decorrer da pista de acesso do caminhão (entrada e saída), na cabine do console de controle e são usados rádios transmissores. Área é monitorada por 5 câmeras de vídeo conectadas a um sistema de

armazenamento de imagens e um monitor de vídeo na cabine de controle auxiliando o monitoramento.



Figura 20: Imagens de monitoração das câmeras de vídeo estrategicamente posicionadas.



Figura 21: Câmeras de vídeo estrategicamente posicionadas.



Figura 22: Saída de som do portal de escaneamento para um tipo de instalação.

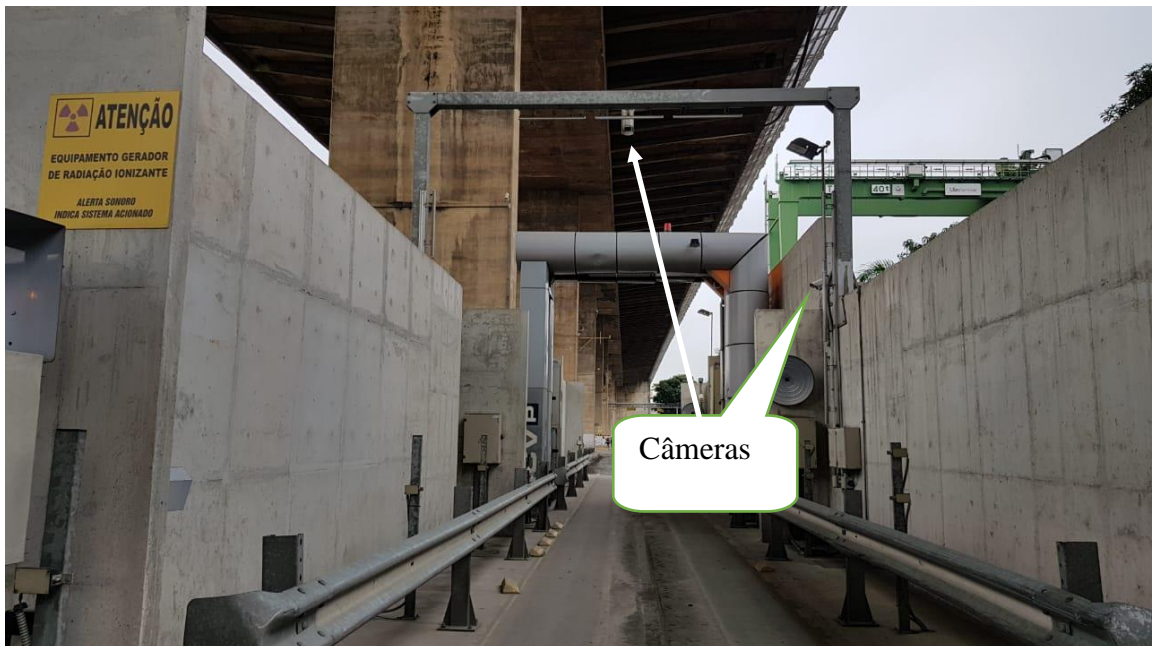


Figura 23: Câmeras no decorrer da área para um tipo de instalação.

3.6.4.3. Sensores Infravermelho, Foto sensitivo e Loop Indutivo

Vários sensores são usados para manter a segurança no fluxo de inspeção com relação a lógica de intertravamento do sistema de segurança. São sensores infravermelhos, foto sensitivo e loop indutivo e são colocados ao longo da pista de inspeção e são usados para detectar a posição do veículo na pista de escaneamento. A indicação pode ser vista no console de comando ou por câmera. Estes sensores são intertravados com a emissão do feixe de Raios X que sai do acelerador e são usados para controle de fluxo de inspeção.



Figura 24: Dispositivos de infravermelho ao longo da pista de inspeção para um tipo de instalação.

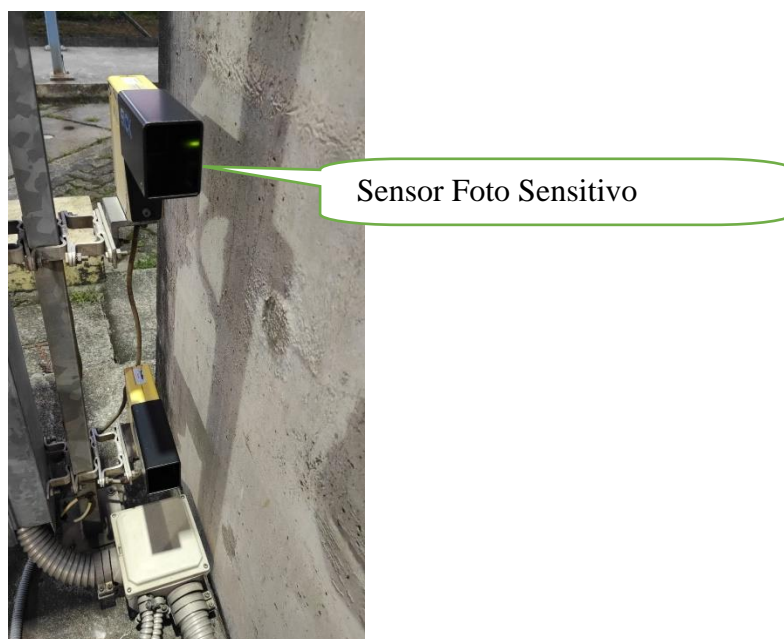


Figura 25: Sensor Foto Sensitivo.

3.6.5. Monitoração Individual e de Área

O sistema de inspeção de contêineres e cargas com uso de Raios X, deverá possuir para monitoramento os dosímetros pessoais (monitores individuais de dose) fornecidos por laboratório credenciado e monitores de área fixos e portáteis verificados quanto à carga das baterias e aferidos com fonte de aferição (fonte teste) antes do uso (LOURENÇO, 2010).



Figura 26: Monitor Individual (Dosímetro).



Monitor Portátil

ura

Figura 27: Exemplos de Monitores Portáteis.



Figura 28: Monitor de Área Fixo.

3.7. Controle de Saúde e Segurança dos Operadores do Sistema

3.7.1. Supervisão Médica e Qualificação dos Operadores de Sistema

A regulamentação do controle de saúde e segurança dos operadores para o sistema de inspeção de cargas e contêineres, pode ser estabelecida de acordo com a gestão de saúde dos trabalhadores. A análise a ser efetuada pela CNEN levará em consideração os aspectos de exposição à radiação ionizante que possam colocar em risco a saúde de indivíduos ocupacionalmente expostos e do público. (CNEN NN 6.02, 2022).

Conforme norma da CNEN NE 3.02 de 2018, referente ao serviço de radioproteção, onde é apresentado o seguinte texto no inciso 6.1.3.6:

A supervisão médica deve abranger os seguintes exames:

a) exame pré-ocupacional para verificar se o trabalhador está em condições de saúde física e mental para iniciar a sua ocupação, incluindo uma análise do seu histórico médico e radiológico contendo todas as informações sobre exposições anteriores;

b) exame periódico, de acordo com a natureza da instalação e com as doses recebidas pelo trabalhador;

c) exames especiais, em trabalhadores que tenham recebido doses superiores aos limites estabelecidos em normas da CNEN, ou sempre que o médico ou o Supervisor de Radioproteção julgar necessário; e

d) exame pós-ocupacional, imediatamente após o término da ocupação no emprego.

Exames pré ocupacional, exames periódicos, exames especiais e exames pós ocupacional, são direitos do trabalhador. O trabalhador tem que solicitar e obter os exames adequado ao trabalho com sistema de inspeção de cargas e contêineres e antes de iniciar o trabalho obter a qualificação e treinamento adequado ao trabalho. Para solicitar a qualificação da empresa os operadores do escâner têm que preencher os seguintes requisitos:

- Ser maior de 18 anos de idade;
- Estar saudável (estado físico e mental);
- Possuir aptidões para o exercício da profissão;
- Ter o Ensino Médio completo;

As instalações devem enviar anualmente a CNEN os seguintes documentos e informações conforme o guia:

1. Relação de operadores da instalação;

No caso de contratação de novos operadores, deve ser encaminhado à CNEN os seguintes documentos:

Comprovante de treinamento (Carga horária de 80h);

Comprovante de conclusão de curso de nível médio;

Cópia de contrato de trabalho;

Comprovante de prestação de serviço de dosimetria individual.

(GUIA CNEN, 2023)

A instalação deve prover supervisão médica adequada a todos os trabalhadores da instalação, conforme descrito na norma NE 3.02 da CNEN, inciso 6.1.3.

A supervisão médica deve ser compatível com os princípios da Segurança e Medicina do Trabalho.

O médico responsável pela supervisão médica deve possuir experiência e conhecimentos relativos aos efeitos e terapêutica associados aos acidentes com radiações ionizantes.

Nenhum trabalhador deve ser empregado, ou continuar empregado, em atividade envolvendo exposições, contrariamente ao parecer médico ou do Supervisor de Radioproteção.

O serviço médico da instalação deve proporcionar primeiros socorros e providenciar internações imediatamente após a ocorrência de acidentes.

3.7.2. Controle de Saúde do Pessoal Operacional do Sistema

Os operadores do sistema de inspeção de cargas e contêineres devem ser qualificados somente após os exames médicos em um hospital ou clínica autorizada e deveram ser reexaminados periodicamente.

O relatório médico deve ser feito para todos os trabalhadores do sistema e os resultados de cada exame e da avaliação médica têm que ser registrado detalhadamente.

Conforme norma do ministério do trabalho os operadores do sistema de inspeção de cargas e contêineres devem obter uma ajuda de custo para a saúde de acordo com as leis. Segundo a Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), atividades com exposição às radiações ionizantes não estão no rol daquelas consideradas perigosas e conforme norma regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego – MTE, as radiações ionizantes são agentes insalubres, sendo sua caracterização realizada de forma quantitativa. (NR 15, 2011)

3.7.3. Controle da Monitoração Individual dos Operadores

O operador do sistema de escaneamento de cargas e contêineres tem de porta um dosímetro pessoal (por exemplo: Filme, TLD ou OSL) certificado pelo CASEC/IRD/CNEN, laboratório designado pelo INMETRO como laboratório nacional de metrologia das radiações ionizantes (CASEC/IRD/CNEN, 2018).

As doses individuais de radiação dos operadores devem ser organizadas e os titulares da instalação deve manter registro dos resultados das monitorações. A troca do dosímetro deve ocorrer de forma mensal. Cabe, ao empregador ou titular do serviço, fornece livre acesso aos dados de dosimetria de cada operador mensalmente (CNEN NE 3.02, 2018).

3.7.3.1. Objetivo da Monitoração Individual

O objetivo principal de programas de monitoração individual é a avaliação das condições de trabalho e das exposições individuais, para demonstrar conformidade com requisitos legais estabelecidos pela CNEN (CNEN NN 3.01, 2014).

3.7.3.2. Responsabilidade da Monitoração Individual

De acordo com a norma CNEN-NN-3.01, os empregadores e titulares das empresas são responsáveis pela monitoração radiológica e deverão buscar um fornecedor reconhecido

de serviços de dosimetria, assegurando que os trabalhadores em áreas controladas estejam sujeitos a dosimetria individual.

3.7.3.3. Localização de Uso do Dosímetro

O dosímetro deve ser usado em um ponto relevante da parte mais exposta da superfície do tórax. O dosímetro individual é de uso exclusivo do usuário no serviço para o qual foi contratado.

Conforme a norma CNEN NE 3.02, quando os dosímetros estão fora de uso devem ser mantidos em local seguro, com temperatura amena, umidade baixa e longe de fontes de radiação ionizante. Devem, ainda, estar junto ao dosímetro padrão (controle). Na suspeita de exposição acidental, o dosímetro individual deve ser enviado para avaliação em caráter de urgência.

3.7.4. Limite de Dose Individual para Trabalhadores

A exposição normal dos operadores que atuam no escâner de inspeção de carga e contêineres com uso de Raios X, deve ser restringida de tal modo que nem a Dose Efetiva nem a Dose Equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, excedam o limite de dose estabelecido pela CNEN na norma CNEN NN 3.01 de 2014.

Dose efetiva:

- 20 mSv por ano, média em 5 anos consecutivos.
- 50 mSv em único ano (máximo em um único ano, sendo necessário justificativa, com a condição de que em 5 anos consecutivos não ultrapasse a 100 mSv).

Dose equivalente:

- cristalino do olho: 20 mSv por ano;
- extremidades (mãos e pés) e pele: 500 mSv por ano.

3.8. Segurança Operacional no Serviço de Inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres

3.8.1. Antes da Operação

Toda instalação que opera um equipamento gerador de radiação ionizante para fins de inspeção de segurança em cargas e contêineres, teve Autorização Para Operação aprovado pela CNEN, como abrange a norma CNEN NN 6.02 e o Guia de Licenciamento de Instalações de Bagagem e Contêineres.

A preparação antes de operar um escâner para inspeção de segurança, um programa formal de teste de verificações de medidas de segurança deve ser realizado para garantir que todos os componentes e dispositivos de proteção contra radiação, incluindo intertravamentos, interruptores, luzes de aviso e indicadores, estejam instalados e funcionando.

As placas de sinalização devem estar afixadas do lado de fora da área controlada e o supervisor de proteção radiológica ou seu substituto deve verificar se todos os trabalhadores estão portando os seus dosímetros individuais.

Nenhum objeto deve estar no canal de inspeção. Todos os painéis de serviço devem estar fechados e travados, sem nenhum sinal de dano que possa comprometer a proteção da barreira; e todos os sinais de aviso devem ser legíveis. Verifique a unidade quanto a qualquer sinal de dano nos painéis, monitores, teclados e cabos visíveis.

O operador do sistema de verificar e se caso ajustar as câmeras de vídeo para assegurar que toda a condição da área de escaneamento está sendo monitorada.

Antes de energizar o sistema, o responsável pela operação deve ordenar que todas as pessoas deixem a área controlada e passagem pela rota de inspeção para evitar que qualquer pessoa permaneça na área. É importante que o operador faça um comunicado através do sistema de comunicação para a todas as pessoas para que deixem a área controlada.

Se algum dos itens citados acima estiver faltando ou danificado, o operador deve relatar a falha.

3.8.2. Cuidados Operacionais

Os efeitos perigosos que a exposição pelos fótons de Raios X podem gerar no corpo são importantes para o entendimento claro das regras de segurança e cuidados operacionais que são empregados na prática de inspeção de segurança. Tais cuidados operacionais podem ser empregados da seguinte forma:

- Um operador ou o supervisor de proteção radiológica deve inspecionar a taxa de dose ao redor da área controlada na primeira exposição feita a cada dia para garantir a segurança, com um equipamento de monitoração adequado para a prática e calibrado.
- O operador que entrar na área controlada tem que levar consigo o medidor portátil para verificar se o feixe está ativo, usando o dosímetro pessoal e levar consigo a chave do painel de controle.
- Pessoa que não trabalhe com sistema de escâner é proibida de entrar na área controlada.
- Quando qualquer pessoa entrar na área controlada, o operador deve ordenar que saia e deixe a área, através do sistema de comunicação. Se a advertência for ignorada, o operador deve interromper o feixe imediatamente.
- O conjunto de chaves do sistema de intertravamento: a chave do controle do acelerador e a chave de reinicialização do botão de emergência, devem estar agrupadas em um mesmo local seguro.
- Quando o sistema é desligado em situação de emergência, antes da causa ter sido encontrada e sanada, o acelerador não poderá ser energizado novamente.
- Os dosímetros individuais e monitores portáteis devem ser guardados em um mesmo local e seguro.
- A micro fonte de aferição (fonte de aferição) deve ser guardada em local seguro.

3.8.3. Cuidados no Procedimento de Manutenção

A manutenção dos aceleradores de partículas exige que os empregadores tenham um programa de manutenção do escâner aprovado pela CNEN, conforme estabelecido no Guia de Licenciamento de Instalações de Bagagem e Contêineres. A instalação deve apresentar um cronograma de manutenção e revisões periódicas, apresentar as especificações das operações a serem realizadas por pessoal da instalação e pelo fabricante ou representante e apresentar a ficha de registro do teste assinado pelo profissional que realizou. (GUIA CNEN, 2023)

Para manter um cuidado na segurança de todos, deve se levar em consideração os seguintes procedimentos na manutenção:

- O pessoal de manutenção deve levar a chave de intertravamento do acelerador.
- O pessoal de manutenção deve portar um equipamento de monitoração adequado e calibrado.
- É indicado pelo menos duas pessoas presente ao mesmo tempo para a manutenção do acelerador de partículas, com dois monitores de dose portáteis.
- Em situações especiais, se for necessário desativar um dispositivo de intertravamento, é necessário obter autorização do supervisor de proteção radiológica e o supervisor irá coordenar a operação. Colocar um aviso de advertência bem visível no local do dispositivo que estiver desativado. Após a manutenção, reinicie o sistema de intertravamento imediatamente, faça um registro e retire o aviso de advertência e o supervisor de proteção radiológica deve verificar o funcionamento do sistema de intertravamento reativado.
- Colocar um sinal de manutenção no console de controle do sistema antes do início do procedimento de manutenção.
- Um relatório detalhado da manutenção deve ser feito.

3.8.4. Estrutura Operacional em Situações de Emergência

Conforme normas da CNEN, devem ser tomadas medidas para reduzir, o quanto for exequível, a contribuição de erros humanos que levem a acidentes ou outros eventos que possam vir a originar exposições inadvertidas ou não intencionais em qualquer indivíduo. (CNEN NN. 3.01, 2014). Dessa forma levando em consideração o sistema de inspeção de segurança de carga e contêineres, todos os trabalhadores têm que conhecer bem as características e recomendações de segurança em caso de emergência e venha agir de acordo com os requisitos estabelecidos no plano de proteção radiológica aprovado pela CNEN.

Toda situação envolvendo exposição temporária de pessoas, em decorrência de acidente, terrorismo ou sabotagem, que implique em intervenção é descrito como emergência. (CNEN NN. 3.01, 2014). Para diminuir a probabilidade de ocorrência de emergência deve se levar em consideração os seguintes fatores:

- Todos os trabalhadores do sistema têm de obedecer integralmente às recomendações de segurança pertinentes descrita no plano de proteção radiológica;
- Ninguém pode modificar os programas de operação e manutenção sem aprovação do supervisor de proteção radiológica e, em casos de modificação de itens importante a segurança, é necessário preencher o requerimento de Autorização para Modificação de Itens Importantes à Segurança e descrever completamente as modificações propostas que só podem ser executadas numa instalação radiativa com prévia autorização da CNEN. (CNEN NN 6.02, 2022)

Parágrafo único. Entende-se por itens importantes à segurança aqueles que incluem ou estão incluídos em:

I - estruturas, sistemas e componentes cuja falha ou mau funcionamento pode resultar em exposições indevidas à radiação do pessoal da instalação ou membros do público em geral;

II - estruturas, sistemas e componentes que evitam que ocorrências operacionais previstas resultem em condições de acidente; ou

III - dispositivos ou características necessárias para atenuar as consequências de falha ou mau funcionamento de estruturas, sistemas e componentes listados nos incisos I e II (CNEN NN 6.02, 2022).

3.8.4.1. Tipos de Acidentes Possíveis em Instalações de Inspeção de Bagagens e Contêineres

As instalações radiativas do subgrupo 7C, onde se enquadra as instalações de inspeção de segurança de bagagens e contêineres, devem solicitar diretamente o Ato Administrativo de Autorização para Operação e encaminhar um Relatório Final de Análise de Segurança – RFAS, que inclua uma breve descrição dos acidentes e situações de emergência (CNEN NN 6.02, 2022).

Segue tipos de acidentes possíveis em instalações de bagagens e contêineres:

I. Em caso do equipamento (acelerador de partícula) não desligar:

- ✓ Acionar o botão de emergência mais próximo desativando o sistema;
- ✓ Colocar a sinalização proibindo a entrada;
- ✓ Desligar a alimentação do acelerador;
- ✓ Não abandonar o local (ficar em área sem risco à exposição);
- ✓ Informar a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
- ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.

i. Roubo do equipamento gerador de raios X (Acelerador de Partícula):

- ✓ Comunicar imediatamente a Polícia Civil
- ✓ Comunicar a CNEN;
- ✓ Solicitar auxílio específico aos titulares da empresa e ao supervisor de proteção radiológica;
- ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorrido no período.

II. Em caso de exposição acidental do Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) ou Indivíduo do Público (IP):

- ✓ Acionar o botão de emergência mais próximo desativando o sistema;

- ✓ Identificar o indivíduo envolvido na exposição;
- ✓ Informar a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
- ✓ No caso de IOE é necessário encaminhar o dosímetro para avaliação em caráter de emergência;
- ✓ Comparar os resultados da avaliação dos dosímetros, com a estimativa de doses realizadas;
- ✓ Caso necessário encaminhar o IOE ou IP envolvido para acompanhamento médico especializado.
- ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.

III. Se por algum motivo o dosímetro cair no chão na área controlada ficando exposto aos fótons:

- ✓ Acionar o botão de emergência desativando o sistema para retirar o dosímetro do local;
- ✓ Informa a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
- ✓ Encaminhar o dosímetro para avaliação em caráter de emergência e comunicar o laboratório;
- ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.

ii. Ocorrência de Acidente no Canal de Passagem (pista durante transporte rodoviário):

- ✓ Acionar o botão de emergência mais próximo desativando o sistema;
- ✓ Chamar a brigada socorrista (caso tenha no local);
- ✓ Atender aos feridos, caso existam;

- ✓ Informa a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
 - ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.
- iii. Em caso de exposição acidental do indivíduo do público na cabine do caminhão:
- ✓ Acionar o botão de emergência mais próximo desativando o sistema;
 - ✓ Identificar o indivíduo do público;
 - ✓ Informa a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
 - ✓ Estimar a dose através de cálculo matemático;
 - ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.
- iv. Em caso de exposição acidental do indivíduo do público no interior do contêiner ou carga:
- ✓ Acionar o botão de emergência mais próximo desativando o sistema;
 - ✓ Identificar o indivíduo do público;
 - ✓ Informa a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
 - ✓ Estimar a dose através de cálculo matemático;
 - ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.
- IV. Em caso de Incêndio ou Explosão na Instalação:
- ✓ Acionar o botão de emergência mais próximo desativando o sistema;

- ✓ Chamar a brigada de incêndio (caso tenha no local);
- ✓ Chamar o corpo de bombeiro;
- ✓ Informa a ocorrência imediatamente ao seu superior de proteção radiológica;
- ✓ Incluir no livro de ocorrência da instalação uma breve descrição do acidente ocorridos no período.

Conforme normas de serviço de radioproteção deve registrar as seguintes informações relativas às áreas da instalação, incluindo relatórios sobre acidente. (CNEN NE. 3.02, 2018)

3.9. Descrição de Eventos em Instalação Radiativa de Inspeção de Segurança de Bagagens e Contêineres

3.9.1. Descrição dos eventos

Conforme a norma CNEN NN 3.01, devem ser realizadas análises relativas à proteção radiológica e à segurança das fontes associadas às práticas em todas as ações e estágios envolvidos, desde a escolha do local até o descomissionamento ou até o fim do controle institucional, a fim de identificar as situações em que possam ocorrer exposições normais e potenciais, levando em consideração os efeitos de eventos externos às fontes, que envolvam diretamente as fontes e/ou os equipamentos a elas associados e determinar a magnitude prevista das exposições normais e, quando razoável e exequível, estimar as probabilidades e os valores das exposições potenciais. (CNEN NN 3.01, 2014)

5.5.3 Devem ser tomadas medidas para reduzir, o quanto for exequível, a contribuição de erros humanos que levem a acidentes ou outros eventos que possam vir a originar exposições inadvertidas ou não intencionais em qualquer indivíduo. (CNEN NN 3.01,2014)

Para suprir a necessidade de uma regulamentação “norma” para as instalações de inspeção de bagagens e contêineres a CNEN em 2015, lançou o Guia de Licenciamento e

surge para delimitar ações para a elaboração de procedimentos operacionais em padrões devidamente seguros.

A Norma da CNEN-NN-6.02, de 2014, dispõe sobre o licenciamento de instalações radiativas que utilizam fontes seladas, fontes não seladas, equipamentos geradores de radiação ionizante e instalações radiativas produtoras de radioisótopos. A referida Resolução apresenta a classificação das instalações radiativas, atos administrativos e requerimentos necessários para o licenciamento e critérios de isenção. No entanto, a Resolução não descreve os parâmetros e critérios técnicos que devem ser observados e avaliados a partir da documentação apresentada pelo requerente para o licenciamento de uma instalação de Inspeção de Bagagem e Contêineres que não atendam aos requisitos de isenção de proteção radiológica. Neste guia estão relacionados os aspectos que devem ser avaliados durante o processo de licenciamento antes que seja emitido cada ato administrativo, assim como as recomendações necessárias para que se cumpra com cada requisito. (GUIA CNEN, 2023)

Desta forma, serão descritos os eventos que podem ocorrer em uma instalação de escâneres de bagagens e contêiner, assim como, serão apontadas estratégias viáveis para mitigar e/ou evitar que tais eventos incorram em exposição para trabalhadores e público.

3.9.1.1. Evento 1: Falha no sistema de câmeras de vídeo

O primeiro contexto analisado foi falha no sistema de câmeras de vídeo e não por acaso, trata-se de uma falha grave comum em todos os locais que necessitam de monitoramento visual, sendo, portanto, um evento facilmente identificável a perda das imagens nos monitores na sala de controle.

A pane aqui considerada pode ser causada por acidentes, naturais ou não, alheios equipamento monitorado, tais como: raios de tempestade, queima do transformador de alimentação da rede do escâner, choques de veículo com poste de alimentação do escâner, choque de objetos voadores (pilotados ou não) com a rede elétrica, entre outros. O evento 1 também pode ocorrer por queima, quebra ou danos que atinjam o equipamento, as câmeras ou os monitores.

A consequência da falha descrita no evento 1 é a não visualização da entrada e saída dos veículos no pátio de inspeção; portanto, não haveria a devida identificação deles. Para evitar tal evento é necessário um gerador à diesel ou à bateria com capacidade (potência) suficiente para que no caso de falta da energia elétrica da rede externa, o escâner não pare seu

funcionamento, como também a manutenção periódica de todos os equipamentos necessários para a devida visualização externa (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.2. Evento 2: Presença de pessoas dentro da área controlada

O evento 2 é considerado pela presença de pessoas dentro da área controlada. Tal situação pode ser identificada pelas câmeras de segurança ou pelo operador que faz o monitoramento de entrada e saída dos veículos. As pessoas na área controlada podem ser IOE ou pessoas do público.

Pode-se, assim, identificar duas situações distintas para tal evento: uma com o irradiador desligado e outra, com o irradiador ligado. Na primeira situação, os seguranças de plantão ou o policiamento local devem retirar imediatamente a pessoa que invadiu a área controlada, o que não ocasionaria nenhuma consequência ao indivíduo. Na segunda situação, com o irradiador ligado, poderia haver uma exposição da pessoa, que está na área controlada, às doses de radiação, o que pode ser classificado como um acidente muito grave. Os seguranças da instalação não poderiam, nesse caso, adentrar a área sem antes efetuar o desligamento do irradiador.

O evento 2 é deveras preocupante, primeiro porque vislumbra uma fragilidade do isolamento da área controlada, segundo porque coloca em risco a segurança da(s) pessoa(s) que adentrar(em) na área isolada. Tal situação se torna extremamente grave caso aconteça um acidente, pois o SPR seria responsabilizado pela dose recebida pela pessoa invasora. Portanto, torna-se primaz o treinamento dos IOEs e dos seguranças/policiamento que fazem a segurança da instalação para debelar os riscos de tal fato ocorrer ou, na ocorrência, minimizar as consequências da situação de exposição.

A inibição de invasão na área de irradiação pode se dar por ação ostensiva ou mesmo preventiva, como, por exemplo, verificar a sinalização da advertência apropriada. Normalmente, como as áreas isoladas costumam ficar a céu aberto, a exposição de placas informativas ao sol e outras intempéries pode danificá-las, o que torna a verificação uma necessidade periódica (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.3. Evento 3: Falha nos monitores de radiação portáteis

O evento 3 é a falha nos monitores de radiação portáteis. A identificação de tal evento dá-se na aferição dos aparelhos com fontes de baixa atividade (fonte de aferição ou fonte teste), de maneira simples, através da aferição diária dos monitores portáteis de radiação, sendo possíveis duas possibilidades para tal falha: primeiro, a bateria fraca ou descarregada, resultando em um monitor que não funcionaria; e, segundo o monitor não faria a leitura correta da taxa de dose da fonte de aferição.

Tal evento pode incorrer em erros na leitura dos monitores quando do levantamento radiométrico periódico da instalação. O operador deve sempre estar atento para a data de calibração dos monitores, como também os monitores de radiação portáteis devem ser aferidos diariamente com as fontes de aferição, para que sejam identificados possíveis problema de bateria (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.4. Evento 4: falha de comunicação entre sala de comando e área externa

O evento 4 é a falha de comunicação entre a sala de comando e a área externa. Tal falha pode ocorrer nas caixas de som, no microfone ou nos comunicadores via rádio, em razão do descarregamento das baterias ou por pane do equipamento. O evento pode ser identificado pela incomunicabilidade entre o operador da sala de comando e o operador externo do controle de tráfego.

Este evento pode causar transtorno no fluxo de caminhão na área controlada no acesso ao irradiador. A maneira mais correta de não ocorrer o evento 4 é a manutenção regular dos equipamentos e a verificação das baterias dos rádios comunicadores diariamente antes do seu uso (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.5. Evento 5: perda da visualização da imagem escaneada na tela

O Evento 5 é identificado pela perda da visualização das imagens escaneada na tela do computador que as captam, ou seja, no local onde são feitas as análises das imagens geradas pelo feixe de raio X do irradiador. Tal evento pode ser iniciado por falhas nas placas captadoras dos raios X (detectores), por pane nos computadores da sala de comando ou, até, pelos mesmos motivos de acidentes externos, como relatado no Evento 1. Como consequência, pode haver paralisação na circulação dos caminhões dentro da área controlada, gerando congestionamento. Outra situação é a de caminhões passando pelo irradiador sem a devida revista na carga transportada, perdendo, assim, a finalidade primaz da instalação que é a de inspeção dos contêineres.

Fazer a manutenção periódica nos monitores de vídeos geradores das imagens vistas na sala de controle e manutenção – também nas telas de captura do raio X provenientes do irradiador – é a solução para inibir a ocorrência de tal evento (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.6. Evento 6: Falha no monitor fixo de área

O evento 6 é a falha no funcionamento do monitor fixo de área. Esse monitor tem como função verificar se existe taxa de dose no ambiente causada por emissão de radiação gama emitida por fontes transportadas pelos caminhões radiografados. É possível ver a falha no monitor no momento dos testes feitos com fonte de aferição.

Seria muito difícil visualizar pelas imagens radiológicas uma pequena porção de material emissor de raios gama; portanto, faz-se necessário o uso do monitor fixo, colocado na entrada da área controlada. Sendo assim, uma das consequências desse evento é a não identificação do transporte, de forma irregular, de material radioativo, ou seja, o transporte deste material não está em conformidade com as exigências da Norma CNEN-NE-5.01-Transporte de Material Radioativo.

Outra consequência grave desse evento é que, pelo fato dessa fonte não estar devidamente blindada, ocorre a exposição de motoristas e de pessoas do público que por ventura se aproximem do caminhão, podendo causar a exposição à IP. Com o caminhão dentro da área controlada da instalação, pode ocorrer exposição nos IOEs.

Como sugestão basilar para evitar que as consequências do evento 6 ocorram, é necessário fazer o teste diário de funcionamento e aferição do detector fixo de área, da mesma

forma como deve ser feito com os monitores portáteis, não esquecendo da calibração no período correto de fazê-lo (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.7. Evento 7: Pane nos sistemas luminosos e sonoros

O evento 7 é a pane nos sistemas luminosos e sonoros que indicam quando o motorista deve avançar com o caminhão ou quando o acelerador de partículas está ligado. Estes dispositivos estão em lugares diversos da instalação.

O primeiro contato visual com um dispositivo luminoso é na passagem da área livre para a área controlada, onde o motorista, com alerta verde ou vermelho, identifica o momento de seguir, ou não, com o caminhão. O segundo contato é o momento em que no caminhão, após passar pelos sensores, incidem sinais luminosos e sonoros que indicam a devida autorização para ser escaneado.

Como consequência desse Evento 7, o caminhão pode adentrar a área controlada sem a devida autorização do sinal luminoso, fazendo com que o IOE externo tenha que intervir ou (o que seria pior) que o caminhão passe pelo irradiador sem indicação se este está ligado ou não, o que acarretaria uma exposição a dose pelo motorista.

Manter a constância em manutenção e teste dos sinais luminosos e sonoros é o que deve ser feito para que tal evento seja coibido e, assim, não ocorra exposição de alguma pessoa ou carga a doses radiativas (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.8. Evento 8: Pane nos sensores

O evento 8 é a pane nos sensores. Os sensores são colocados ao longo do canal de inspeção, e servem para detectar a posição do veículo. São utilizados 3 modelos de sensores: loop indutivo (laço indutivo), localizados no chão do canal de inspeção, com função de detectar a massa metálica do veículo; sensores infravermelhos (sensores de proximidade) e sensores fotos-sensitivos (sensores fotoelétricos), ambos com a função de detectar a presença e distância do veículo.

É através dos sensores que o sistema do acelerador controla a sincronia da emissão dos raios X com a velocidade do veículo. A causa desse evento será indicada no momento em que

o caminhão adentrar na região do irradiador e não for devidamente "lida" pelo sistema a velocidade do caminhão, o que pode ocasionar uma falha na visualização das imagens radiográficas ou, o que seria mais danoso, pode não permitir a devida mensuração do tamanho da boleia do caminhão, resultando numa exposição do motorista ao feixe de raio X do irradiador.

Tal evento não pode, em hipótese alguma, acontecer. Portanto, faz-se necessário um constante monitoramento do funcionamento dos sensores com testes periódicos nos mesmos (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.9. Evento 9: Falha na blindagem

O evento 9 é a falha na blindagem disposta em lugares estratégicos com a finalidade de atenuar o feixe de radiação primária e secundária, e garantir que o nível de radiação esteja dentro dos padrões estabelecidos pela CNEN. O irradiador é auto blindado, ou seja, os raios X primários atravessam uma fenda estreita, direcionada somente para os detectores, enquanto, em todas as outras direções, o tungstênio e o chumbo são utilizados como blindagem (GROFF,2017).

Ainda são utilizados como blindagem blocos atrás dos detectores para atenuar o feixe de raios X primários que atingem estes detectores, e paredes de concreto localizadas também atrás dos detectores e da cabine do acelerador, garantindo que o nível de radiação ionizante fora da área controlada permaneça abaixo dos limites determinados pela CNEN (GROFF,2017).

Portanto, o evento não leva em conta o irradiador, já que ele é auto blindado. Nossa preocupação é com a blindagem que deve ser feita na direção do feixe primário que deve ser colocada atrás dos detectores e da cabine do acelerador.

O evento só é identificado quando feito um levantamento radiométrico atrás dos detectores e do irradiador, comprovando que o feixe transpassou a parede de blindagem para a área livre. Como consequência poderá ter um IOE ou IP expostos ao raio X emitidos. A única solução é o levantamento radiométrico periódico na área livre nos locais acima citados, e, se necessário, fazer reforço na blindagem (SILVA FILHO, 2020).

3.9.1.10. Evento 10: Falha no sistema de intertravamento

O evento 10 é a falha no funcionamento de um dos itens do sistema de intertravamento de segurança. O Sistema é composto por dispositivos elétricos que têm a função de interromper imediatamente, quando acionados, o sistema do acelerador para que não ocorra a produção ou emissão do feixe de radiação ionizante.

Os dispositivos que integram este sistema são: botões de emergência (botoeiras de pressão), cordões de emergência, porta-chaves, portas com chaves tipo fim de curso e travas mecânicas. Alguns destes ficam localizados apenas na área controlada, como no caso dos cordões de emergência, localizados no canal de inspeção; outros dispositivos, como os botões de emergência (botoeiras de pressão), ficam localizados tanto na área controlada como também na cabine do acelerador (localizada na área controlada) e na sala operacional (localizada na área livre) (GROFF,2017).

Tal evento é deveras preocupante, pois outros fatores como a invasão de pessoas na área controlada, a perda de sinal sonoro e/ou visual ou a falha no sistema de sensores, caso aconteçam, devem imediatamente cessar a emissão do feixe de raio X.

Caso o evento se concretize, há uma possibilidade bem significativa de haver exposição a um IOE ou IP. A manutenção periódica do sistema de intertravamento acompanhado de simulações do evento deve coibir tais eventos (SILVA FILHO, 2020).

Na Tabela abaixo, apresenta-se a síntese do evento indicador, o evento iniciador, a consequência e sugestões, em instalações radiativas de inspeção de bagagens e contêineres.

Tabela 2: Evento Indicador, Evento Iniciador, Consequências e Sugestões.

Evento	Evento indicador	Evento iniciador	Consequências	Sugestões
1	Perda da visualização das imagens geradas pelas câmeras de vídeo nos monitores da sala de controle	Dano no monitor ou nas câmeras de vídeo, devido a problemas técnicos ou naturais, internos ou externos à instalação	Não visualização da entrada e saída dos veículos e pessoas na instalação, podendo haver descontrole no trânsito	Utilização de um gerador a diesel e manutenção regular dos equipamentos
2	Visualização de pessoas por meio de monitores da sala de controle na área controlada da instalação	Pessoas, IOEs ou pessoas do público, dentro da área controlada da instalação	Pode ocorrer exposição da pessoa invasora da área controlada	Reforço para as barreiras de acesso à área controlada e capacitação das pessoas que fazem a segurança do local
3	Funcionamento irregular de monitores de radiação	Falha ou leitura incorreta dos monitores portáteis de radiação da fonte de aferição	Leitura incorreta quando do levantamento radiométrico da instalação	Aferir diariamente os monitores e calibrá-los de acordo com a legislação vigente
4	Ausência de comunicação entre o operador da sala de controle e o operador externo	Falha no funcionamento dos sistemas de comunicação; microfonecaixa de som; rádios comunicadores	Transtorno no fluxo de caminhão dentro da área do irradiador	Manutenção regular dos equipamentos e verificação diária das baterias
5	Perda da visualização das imagens geradas pelos raios X	Dano na tela de captura de imagem ou pane no terminal vídeo da sala de controle	Interrupção da circulação dos caminhões ou caminhões passando pelo irradiador sem revista	Fazer manutenção periódica nos terminais de vídeos da sala de e nas telas de captura do raio X
6	Perda de visualização da leitura do monitor fixo de área	Falha no monitor de radiação fixo de área durante a aferição	Não identificação de caminhões que estejam transportando, de maneira indevida, fontes emissoras gama	Aferição diária e manutenção periódica e regular do monitor
7	Perda dos sinais luminosos (visuais) e/ou sonoros	Falha nos sistemas sonoros e luminosos quando o irradiador for acionado	Acesso à área controlada com o irradiador ligado podendo ocasionar exposição	Manutenção e testes simuladores dos sinais luminosos e sonoros
8	Ativação do irradiador sem o desconto linear no comprimento da boleia	Falha no sistema de sensores	Falha na visualização da imagem radiográfica e/ou na passagem do caminhão com o irradiador ativo, gerando exposição	Monitoramento regulado e testes periódicos nos sensores.
9				Levantamento

	Falha de blindagem	Cálculo de blindagem incoerente com a energia do feixe	Exposição a IOEs ou IP com o feixe de raio-X do irradiador	radiométrico periódico e reforço na blindagem
10	Não funcionamento do sistema de intertravamento no momento de acioná-lo	Falha no sistema de intertravamento quando da necessidade de desligamento emergencial do acelerador	Ocorrência de exposição a altas doses em IOE ou IP	Manutenção periódica e regular e simulações do evento no sistema

A identificação de eventos em uma instalação radiativa para fins de escâner de cargas e contêiner adverte quanto a pontos existentes onde podem ocorrer problemas setorizados. A descrição dos eventos identificadores e iniciadores fornece uma maneira abrangente de vislumbrar vários problemas técnicos e humanos que podem ocorrer na instalação, auxiliando, assim, nas medidas a serem tomadas para que tais eventos não aconteçam. Caso o evento já tenha ocorrido, a descrição destes, como é posta neste capítulo, fornece subsídio para mitigá-los (SILVA FILHO, 2020).

A descrição de eventos mostra uma maneira abrangente de conhecer todos os setores da instalação em que podem ocorrer eventos, o que auxilia o treinamento dos operadores e dos IOEs lotados na instalação.

CAPÍTULO 4

4. Materiais e Métodos

Para o estudo do tema proposto, foi utilizada abordagem tanto quantitativa quanto qualitativa na pesquisa de campo que ocorreu em instalações, classificadas no subgrupo 7C conforme Norma CNEN NN-6.02, que está autorizada a operar, sob o ponto de vista de proteção radiológica, na área de Segurança, na prática Inspeção de Bagagens e Contêineres. O equipamento emissor de radiação autorizado pela CNEN é um acelerador de partículas do fabricante Smiths Heimam, modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV. O equipamento possui área de operação reduzida devido à construção de barreiras primárias e secundárias. O escâner tem a carga horária de funcionamento vinte e quatro horas por dia e sete dias por semana.

Este trabalho utiliza como base, medidas realizadas *in loco* no escâner de raios X para inspeção de bagagens e contêineres, uso de normas em proteção radiológica, recomendações internacionais, guias e trabalhos científicos que envolve acelerador de partícula em instalação de inspeção com raios X.

Por ser um equipamento gerador de radiação ionizante que atua em altas energias e assumindo que as barreiras físicas da área controlada podem serem violadas e considerando as lições aprendidas em acidentes com aceleradores de partículas, ocorre a preocupação em evitar acidentes com a equipe de manutenção e técnica, gera-se a necessidade de uma estimativa de dose na área externa e interna onde ocorre a passagem do caminhão e inclusive no caminhoneiro. Criando parâmetros que serão úteis em casos de acidentes e apoiando em sugestões para criação de normas em inspeções de cargas e contêiner, úteis na segurança pública.

4.1. Equipamentos utilizados no acelerador de partículas modelo HCVP

Foram utilizados cinco Monitores de Radiação Pessoal Modelo Rad Eye PRD-ER, fabricante: Thermo Fisher Scientific, do tipo detector cintilador. Este monitor conta com um circuito que permite faixa de medição da taxa de dose equivalente ambiente [$H^*(10)$] de 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ (ou 1 $\mu\text{rem/h}$) até 100 mSv/h (ou 10 rem/h), com erro máximo de até 20% conforme fabricante. Também foram utilizados cinco Monitores de Radiação Pessoal Modelo: MRAD 111, fabricante: Ultra Radac, do tipo detector Geiger-Muller, com suas principais características faixa de medição da taxa de dose equivalente ambiente de 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ (ou 1,0 $\mu\text{rem/h}$) a 2 Sv/h (ou 200 rem/h) e dose equivalente ambiente integrada [$H^*(10)$] no intervalo 0,001 μSv (ou 0,1 μrem) a 9,99 Sv (ou 999 rem). A incerteza dos equipamentos varia em torno de $\pm 30\%$ para faixas em 100 $\mu\text{rem/h}$ (1 $\mu\text{Sv/h}$) a 200 rem/h (2,0 Sv/h). Durante as atividades de medida foi usado também um detector e identificador SpiR-ID, fabricante MIRION TECHNOLOGIES, Modelo F 8929 MGP. Este instrumento utiliza um detector NaI (TI) (iodeto de sódio dopado com tálio) que além de operação em temperatura ambiente, permite faixa de medição da taxa de dose equivalente ambiente [$H^*(10)$] para fótons de 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ a 9999 $\mu\text{Sv/h}$ (1 $\mu\text{rem/h}$ a 1000 mrem/h), dose equivalente ambiente integrada varia de 1 μSv a 999.999 μSv . Para ampliação da análise da área foram realizadas medidas de dois terminais portuários (instalação A e B) durante cinco anos consecutivos, foram utilizados seis dosímetros de área conhecidos como Extras 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Dosímetros da empresa: Sapr Landauer Serviço de Assessoria e Proteção Radiológica Ltda, modelo OSLD.

O motorista deve dirigir o caminhão em velocidade aproximada de 10 km/h dentro do canal de varredura de inspeção, como mostram as Figuras 32, 34 e 35. A transmissão do feixe de fótons de raios X começa automaticamente após a cabine do caminhão passar pelos sensores do canal de escaneamento, formando um campo de radiação.

A calibração dos equipamentos foi realizada por métodos de comparação sob condições rigorosamente controladas, considerando nível de confiança de aproximadamente 95% para aplicação de uma fonte de Co-60. Embora se tenha uma calibração com fonte emissora gama, que apresenta espectro discreto. Este procedimento é um padrão e foi adotado para os sistemas de detecção garantindo a confiabilidade entre as leituras dos instrumentos de medição e os valores indicados por um padrão internacional. Este padrão é rastreado por meio

de uma rede de metrologia do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, que integra a rede dos Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário, da Agência Internacional de Energia Atômica para que seja aferido o valor real de $H^*(10)$.

Tudo foi possível com a cooperação com Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN) do exército Brasileiro, que nos forneceu os monitores para a realização das medidas. Todos os equipamentos estavam devidamente calibrados e foram testados em conjunto com o IDQBRN. O apoio, participação e cooperação da empresa EBCO SYSTEMS LIMITADA, foi de extrema importância para execução deste trabalho.

4.2. Levantamento dos dados no acelerador de partículas modelo HCVP

Os equipamentos cinco Monitores de Radiação Pessoal Modelo Rad Eye PRD-ER, fabricante: Thermo Fisher Científico, do tipo detector cintilador, cinco Monitores de Radiação Pessoal Modelo: MRAD 111, fabricante: Ultra Radac, do tipo detector Geiger-Muller, foram colocados em cinco pontos de interesse estratégicos, conforme esquema apresentado na Figura 32, elaborado para facilitar a identificação dos pontos (croqui foi criado para demonstrar o local do acelerador e os cinco pontos de interesse de medição). Em cada um desses pontos (ver Tabela 3), foram colocados dois detectores juntos, ou seja, as medidas foram tomadas simultaneamente por dois detectores sendo um Geiger Muller e um cintilador. O número de escaneamentos de contêineres foi limitado a 30 por razões de logística e operação da unidade de inspeção sem comprometer, no entanto, a qualidade dos dados. Foram escolhidos quatro pontos de medida para o feixe espalhado, considerando que uma posição é de feixe direto (posição 4 na Figura 32), tendo sido realizadas 2 campanhas de medidas (Grupo 1 e 2). Considera-se que cada inspeção toma aproximadamente nove segundos de exposição ao feixe de fótons de raios X proveniente do acelerador.

Tabela 3: Descrição dos Pontos Críticos

Ponto	Descrição dos Pontos	Tipo de Feixe
01	Parte superior do Modulador, dentro da cabine onde fica o acelerador, conforme a Figura 29	Espalhado
02	Parede externa de saída do feixe de raios X, dentro da cabine onde fica o acelerador, conforme a Figura 30	Espalhado
03	Lado direito do detector do escâner que recebe o feixe direto, conforme a Figura 31	Espalhado
04	Detector do escâner usado para formação da imagem, conforme a Figura 31	Transmitido
05	Lado esquerdo do detector do escâner que recebe o feixe direto, conforme a Figura 31	Espalhado



Figura 29: Equipamento de medição colocado na parte superior do Modulador, dentro da cabine onde fica o acelerador, referente ao ponto 1.



Figura 30: Equipamento de medição fixado na parede externa de saída do feixe de raios X, dentro da cabine onde fica o acelerador, referente ao ponto 2.

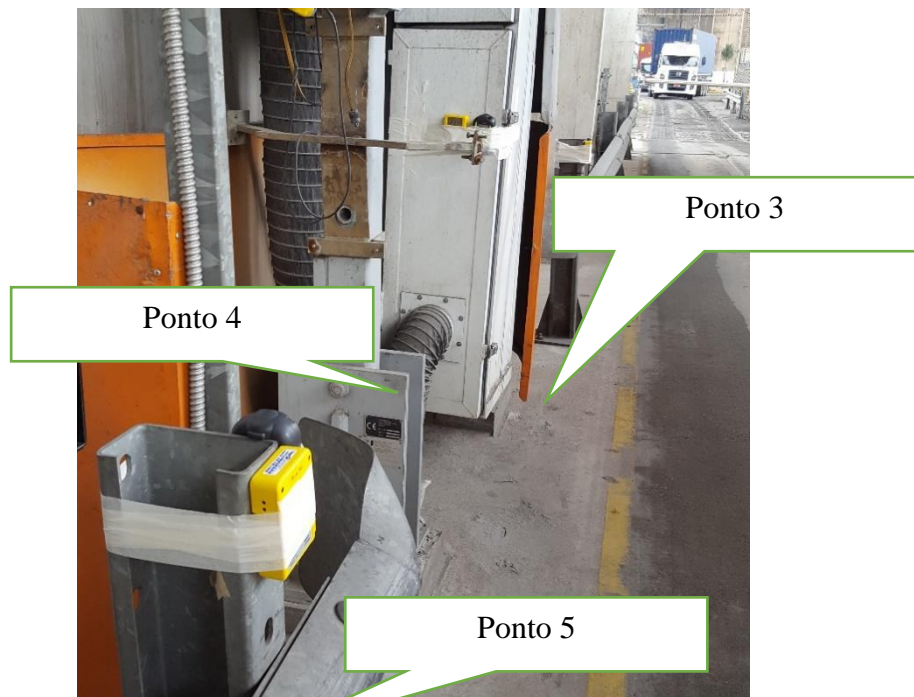


Figura 31: Equipamentos de medição fixados na área controlada, referente ao ponto 3, 4 e 5.

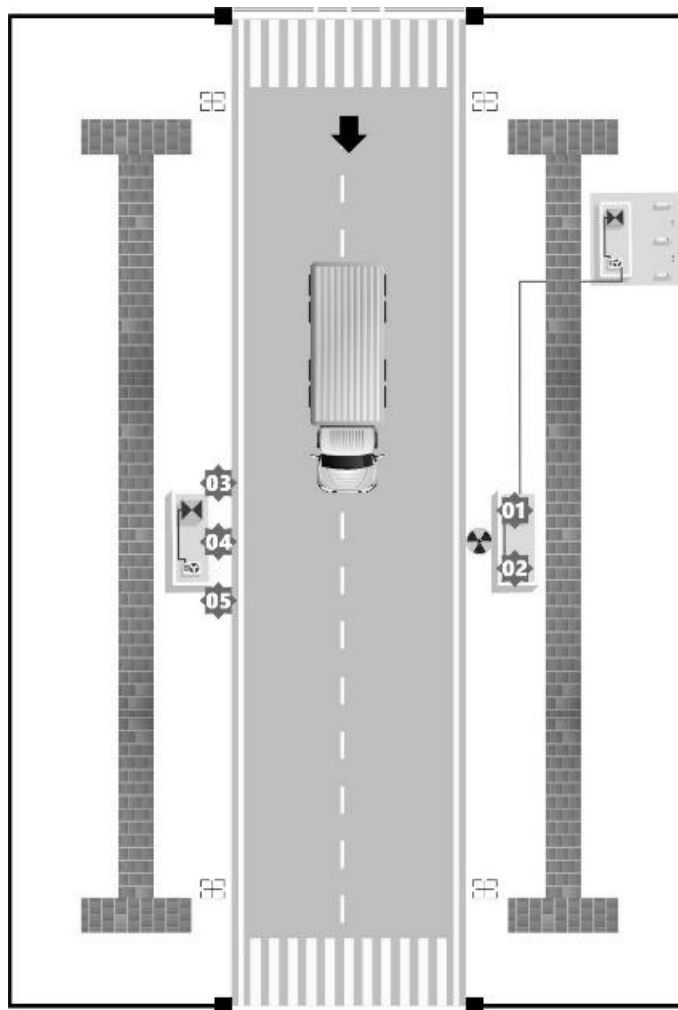


Figura 32: Esquema indicando a localização dos cinco pontos de medida selecionados conforme descrição da Tabela 3.

Em nova análise foi utilizado o equipamento SpiR-ID no ponto 1 (equipamento de medição colocado na parte superior do Modulador, dentro da cabine onde fica o acelerador, conforme a Figura 33). Também foi utilizado para abordagem da taxa de dose equivalente $[H^*(10)]$ na cabine do motorista (o motorista deve dirigir o caminhão em baixa velocidade dentro do canal de varredura de inspeção, como mostra a Figura 32, 34 e 35, e por meio dos sensores do canal de escaneamento o início de transmissão do feixe de fótons de raios X forma um campo de radiação automaticamente depois que a cabine do caminhão passa pelos sensores. Isso garante que a cabine, com o motorista dentro, não seja atingida pelo feixe direto, mas apenas o contêiner). O equipamento também foi utilizado na área de entrada do canal de inspeção em sete pontos diferentes com um incremento de distância entre as medidas de um metro, conforme pode ser visto na Figura 34 e descrito na Tabela 4.

Os pontos de monitoração A a H (Figura 34) delimitam um perímetro fora da área controlada. A região da cabine do motorista ponto I (Figura 34) é o local de acomodação do equipamento de monitoração SpiR-ID em relação ao feixe espalhado. Os pontos de monitoramento de J a P (Figura 34) estão dentro da área controlada, também acomodam o equipamento SpiR-ID e são localizados a partir do feixe principal (ponto J), espaçados a uma distância de 1 m entre cada um e a 1,2 m de altura em relação ao solo.

Assim, os dados amostrados nos pontos A a H representam a distribuição da taxa de dose de radiação na área externa as barreiras físicas, o ponto I se refere a taxa de dose de radiação à qual o motorista do caminhão está sujeito ao se movimentar pelo canal de varredura. Os pontos de J a P são localizados onde há uma passagem de pedestre que pode ser utilizada por um trabalhador da instalação para resolver problemas específicos no canal.



Figura 33: Equipamento SpiR-ID colocado na parte superior do Modulador, dentro da cabine onde fica o acelerador - Ponto 1.

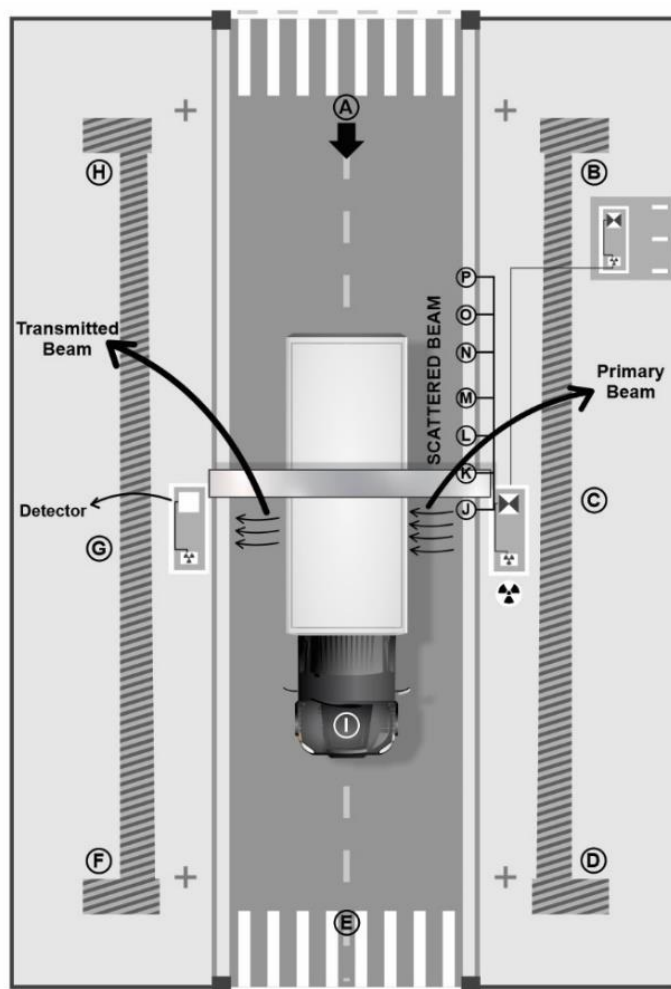


Figura 34: Esquema indicando os pontos de medidas com o equipamento SpiR-ID.

Tabela 4: Descrição dos sete pontos de monitoração (Figura 34) dentro da área controlada para o equipamento SpiR-ID.

Ponto	Descrição dos Pontos (conforme a Figura 34)	Tipo de Feixe
J	Ao lado do feixe incidente de transmissão	Espalhado
K	Distante 1 m do feixe de transmissão	Espalhado
L	Distante 2 m do feixe de transmissão	Espalhado
M	Distante 3 m do feixe de transmissão	Espalhado
N	Distante 4 m do feixe de transmissão	Espalhado
O	Distante 5 m do feixe de transmissão	Espalhado
P	Distante 6 m do feixe de transmissão	Espalhado

Tabela 5: Descrição dos pontos de monitoração (Figura 34) fora da área controlada e na cabine do motorista para o equipamento SpiR-ID.

Ponto	Descrição dos Pontos	Tipo de Feixe
A	Entrada do canal de inspeção	Espalhado
B	Atrás da barreira de atenuação do feixe	Espalhado
C		Espalhado
D		Espalhado
E		Espalhado
F	Saída do canal de inspeção.	Espalhado
G	Atrás da barreira de atenuação do feixe.	Espalhado
H		Espalhado
I	Cabine do caminhoneiro	Espalhado

Em outra análise, durante as atividades de medidas *in loco* no terminal portuário (instalações A e B), durante cinco (5) anos consecutivos, foram utilizados seis (6) dosímetros de área. Os dosímetros foram inseridos nas áreas conforme esquema na Figura 35, em atividade ordinária de inspeção. Estes dosímetros foram removidos e trocados mensalmente para leituras, conforme recomendação CNEN NE-3.02; 2018. Tipo de radiação detectada raios X, certificação no Brasil emitida pela CASEC/IRD/CNEN. Os dosímetros OSL, tem possibilidade de releitura: Caso haja dúvidas em relação às doses reportadas, é possível realizar uma nova análise dos dosímetros de forma segura e totalmente confiável, com perda de apenas 0,1% do nível de precisão a cada leitura. O modelo convencional do detector contém filtros de plástico e metal (alumínio e cobre) e um conjunto de quatro sensores de óxido de alumínio crescido em atmosfera de carbono (Al₂O₃ - °C). Para proteção, os dosímetros são selados em uma bolsa plástica à prova d'água. A Tabela 6 apresenta os pontos de localização dos dosímetros e as Tabelas 19 e 20 apresentam valores de dose registrados levando em conta os seguintes parâmetros: (a) Número de escaneamento; (b) dose equivalente ambiente acumulada [mSv] para cada data indicada nos anos de 2018 a 2022; (c) medidas de dose em todos os meses de janeiro a dezembro para duas instalações de portos, em locais diferentes e fluxo de escaneamento conforme atividade portuária (instalação A e B).

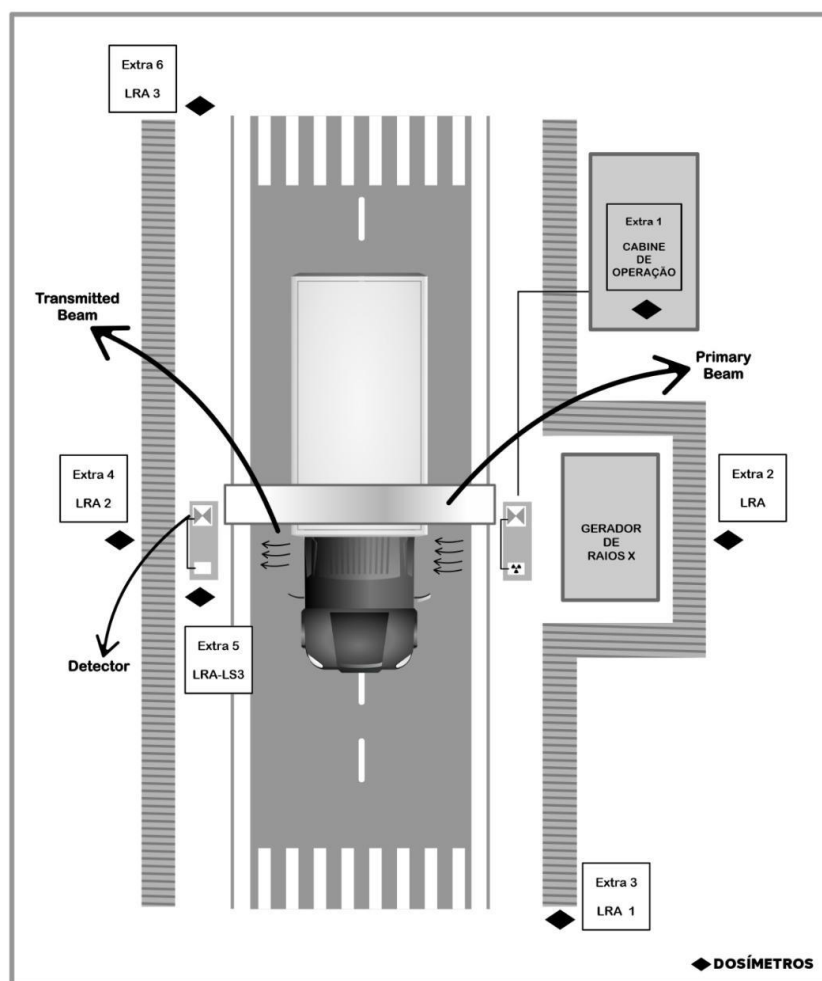


Figura 35: Imagem da localização dos dosímetros de área extra (1 a 6) e vista do equipamento.

Tabela 6: Descrição dos pontos onde foram localizados os dosímetros de área, referente a Figura 35.

Ponto	Descrição dos Pontos	Tipo de feixe
Extra 1	Cabine de operação onde ficam os operadores.	Espalhado
Extra 2	Parede externa atrás da cabine do acelerador.	Espalhado
Extra 3	Ponto de saída da área supervisionada.	Espalhado
Extra 4	Parede externa atrás da blindagem que recebe o feixe transmitido.	Transmitido
Extra 5	Ponto na altura e início da cabine do motorista.	Espalhado
Extra 6	Ponto de entrada da área supervisionada.	Espalhado

4.3. Equipamento e levantamento dos dados no acelerador de partículas modelo HCVM-MOBILE

Para outra análise, em duas instalações com escâner móvel, instalações definidas como X e Y, conduzido em um sistema que utiliza um acelerador de partícula com energia máxima para os elétrons acelerados de 3,8 MeV, de fabricação Smiths detection, modelo HCVM-MOBILE, número de série 851524 (instalação X) e número de série 522 (instalação Y).

Neste estudo será mostrado a exposição na cabine do motorista do caminhão, para modelo HCVM-MOBILE, veículo pelo qual a carga será escaneada. O início de transmissão do feixe de fótons de raios X forma um campo de radiação após a cabine do caminhão, isso garante que a cabine, não seja atingida pelo feixe direto, mas apenas o contêiner.

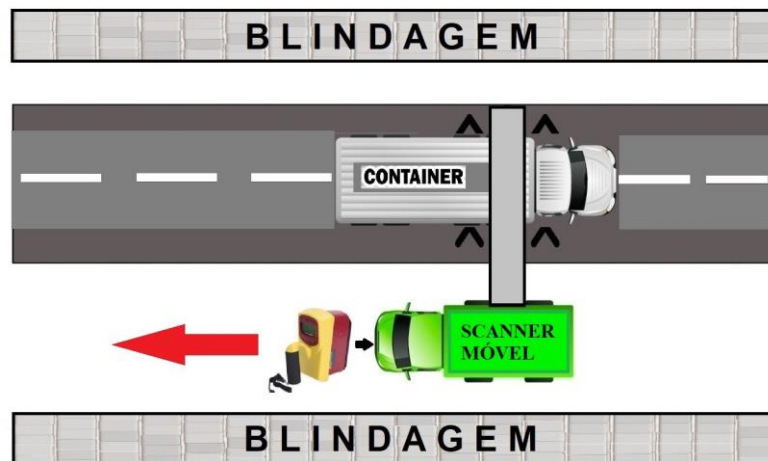


Figura 36: Imagem vista do equipamento HCVM

Durante as atividades de medida *in loco* na instalação X, foi utilizado um medidor tipo Câmara de Ionização, Fabricante: LUDLUM / Modelo: 9DP, número de série: 25007006, que permite faixa de medição da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ na ordem de radiação de fundo até 50 mSv/h e de energia superior a 25 keV para fótons. Certificado de calibração do equipamento 12445/0923, laboratório que realizou a calibração do instrumento LMRI/DEN/UFPE.

O medidor foi colocado na cabine do motorista como mostra o esquema na Figura 36. O instrumento de medição após os escaneamentos dos containers (em atividade ordinária de inspeção) foi removido para leitura da dose equivalente integrada, descontando a radiação de fundo, apresentado na tabela 23. No total ocorreram 62 medidas em 3 dias. A instrumentação escolhida para a investigação da dose equivalente ambiente, forneceu um novo conjunto de dados dosimétricos, por meio de análise quantitativa e qualitativa, na prática HCVM.

Em visitas a instalação Y, foi utilizado dois medidores, uma Câmara de Ionização e um Geiger Muller.

Câmara de Ionização Fabricante: FLUKE BIOMEDICAL / Modelo: 451P, número de série: 2124, que permite faixa de medição da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ para fótons de 0 mSv/h a 50 mSv/h e de energia superior a 25 KeV. Certificado de calibração do equipamento 12292/0623, laboratório que realizou a calibração do instrumento LMRI/DEN/UFPE.

GEIGER-MULLER Fabricante: THERMO SCIENTIFIC / Modelo: FH40 GL10, número de série: 019483, que permite faixa de medição da dose equivalente ambiente integrada de $H^*(10)$ para fótons de 0,1 μ Sv a 10Sv e faixa de energia de 30KeV a 4,4 MeV. Certificado de calibração do equipamento 12130/0123, laboratório que realizou a calibração do instrumento LMRI/DEN/UFPE.

Utilizando o mesmo princípio usado na instalação X, será mostrada a exposição na cabine do motorista do caminhão. Conforme visto na Figura 36, o instrumento de medição após os escaneamentos dos containers, foi removido para leitura. Para cada valor de dose integrada apresentado na Tabela 24, ocorreu com a seguinte metodologia: após 5 (cinco) medidas foi gerada a média dos cinco valores correspondentes, gerando a média da dose equivalente integrada, descontando a radiação de fundo. No total, 50 (cinquenta) medidas foram tomadas em 10 dias.

CAPÍTULO 5

5. Resultados e Discussão

Serão apresentados os resultados do estudo de campo com utilização dos monitores e medidores descritos no capítulo 4 (metodologia).

5.1. Valores de equivalente de dose ambiente [H*(10)] para o medidor Radeye e MRAD dentro da área controlada

Após duas campanhas de medidas (Grupo 1 e Grupo 2) com trinta escaneamento (passagem normal de investigação de cargas e contêineres), analisando a leitura H*(10)[μSv] de cada equipamento de forma individual foram encontrados valores máximos e mínimo de dose integrada no Monitor de Radiação Pessoal Modelo RadEye PRD-ER, tipo Cintilador, entre 0,94 μSv (máximo) e 0,55 μSv (mínimo), apresentados na Tabela 7 e Figura 37. Observando pouca variação de dose integrada nos cinco pontos definidos para as trintas varredura de escaneamento. Para o Monitor de Radiação Pessoal Modelo MRAD 111, Ultra Radac, tipo Geiger-Muller, as doses integradas variaram entre 33,560 μSv (máximo) e 2,7 μSv (mínimo), conforme mostrado na Tabela 7. Observando maior variação de dose integrada nos cinco pontos definidos para as trintas varredura de escaneamento. Esses dados foram obtidos em um equipamento modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV.

Tabela 7: Equivalente de dose ambiente integrada (μSv) com RadEye e MRAD nos pontos e Grupo 1 e Grupo 2.

Ponto	Modelo	Grupo 1	Grupo 2
1	RadEye	$0,74 \pm 0,15$	$0,79 \pm 0,16$
	MRAD	$3,64 \pm 1,1$	$3,00 \pm 0,9$
2	RadEye	$0,63 \pm 0,12$	$0,73 \pm 0,14$
	MRAD	$9,34 \pm 2,8$	$15,56 \pm 4,6$
3	RadEye	$0,84 \pm 0,17$	$0,83 \pm 0,16$
	MRAD	$5,65 \pm 1,7$	$4,72 \pm 1,4$
4	RadEye	$0,69 \pm 0,14$	$0,55 \pm 0,11$
	MRAD	$33,56 \pm 10,0$	$26,86 \pm 8,0$
5	RadEye	$0,89 \pm 0,18$	$0,94 \pm 0,19$
	MRAD	$4,71 \pm 1,4$	$2,70 \pm 0,8$

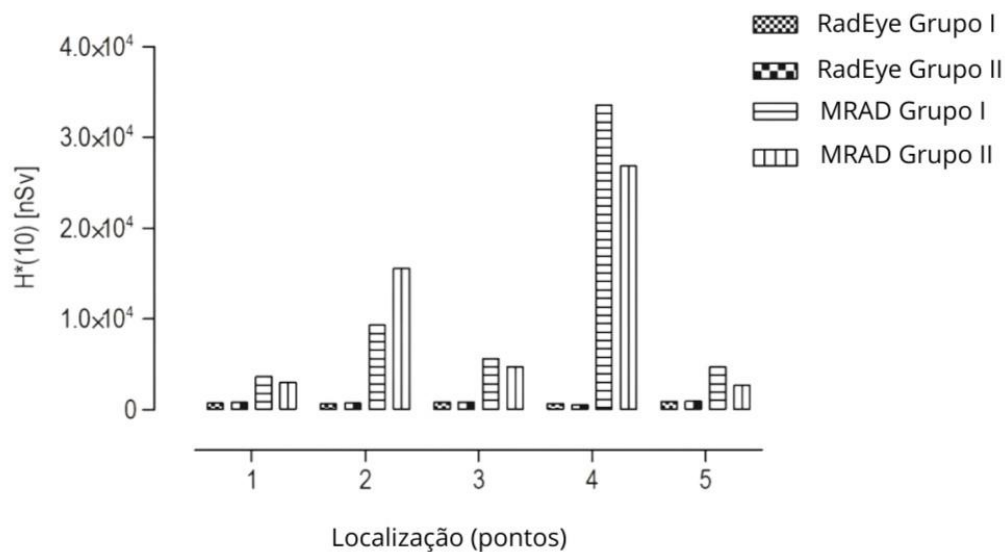


Figura 37: Apresenta os resultados $H^*(10)$ [nSv] comparados das duas campanhas de medida (Grupos 1 e 2).

Os dados apresentados na Figura 37 mostram discrepâncias de medidas entre os dois detectores utilizados. Mesmo calibrados, ocorreram diferenças entre os valores medidos, com valores do detector a gás (MRAD-111) superiores ao cintilador (RadEye) em pelo menos uma ordem de grandeza. Outro ponto que merece destaque é a variabilidade das medidas em função dos pontos selecionados (1 a 5). O cintilador não foi capaz de diferenciar o feixe direto (ponto 4 na Figura 37) dos feixes espalhados. Este fato é relevante em proteção radiológica ocupacional sugerindo que o RadEye não possui características de detecção que permitam sua utilização nessa função.

A avaliação das medições apresentadas na Figura 37 permite verificar que os resultados do RadEye não apresentaram correlação direta com aquelas realizadas utilizando o detector Geiger-Müller (MRAD 111), independentemente do ponto e do grupo. Os pontos se localizam em uma região de significativo espalhamento de fótons e conseqüente incremento artificial do sinal gerado. Este incremento implica em alteração da altura do pulso podendo ser interpretada com uma energia diferente acarretando, neste caso, subestimativa da dose recebida. Também, a saturação do cintilador incluindo radiação secundária pode influenciar na forma do espectro (KNOLL, 1989; RIBAS 2020). Uma vez que o espectro de *Bremsstrahlung* é contínuo, não são esperados novos picos, embora se considerem adições ao espectro de forma contínua pela sobreposição de valores. Este tipo de contribuição não pode ser subtraído do espectro como é feito com medidas para o espectro background podendo ter

como consequência à introdução de erros nas áreas dos picos. Para minimizar esse efeito, o uso de absorvedores é recomendado (KNOLL, 1989; RIBAS 2020).

Tabela 8: Equivalente de dose ambiente [$\mu\text{Sv}/\text{scan}$] para RadEye PRD-ER (A) e MRAD 111 (B).

Ponto	Modelo	Grupo 1	Grupo 2
1	A	$0,02 \pm 4,0\text{E-}3$	$0,03 \pm 6,0\text{E-}3$
	B	$0,12 \pm 3,6\text{E-}2$	$0,10 \pm 3,0\text{E-}2$
2	A	$0,02 \pm 4,0\text{E-}3$	$0,02 \pm 4,0\text{E-}3$
	B	$0,31 \pm 9,3\text{E-}2$	$0,52 \pm 1,5\text{E-}1$
3	A	$0,03 \pm 6,0\text{E-}3$	$0,03 \pm 6,0\text{E-}3$
	B	$0,19 \pm 5,7\text{E-}2$	$0,16 \pm 4,8\text{E-}2$
4	A	$0,02 \pm 4,0\text{E-}3$	$0,02 \pm 4,0\text{E-}3$
	B	$1,12 \pm 3,3\text{E-}1$	$0,89 \pm 2,7\text{E-}1$
5	A	$0,03 \pm 6,0\text{E-}3$	$0,03 \pm 6,0\text{E-}3$
	B	$0,16 \pm 4,8\text{E-}2$	$0,09 \pm 2,7\text{E-}2$

O monitor de radiação pessoal modelo MRAD 111, Ultra Radac, (ver Tabela 8) apresentou equivalente de dose ambiente variando entre os valores máximo e mínimo 1,12 e 0,09 $\mu\text{Sv}/\text{scan}$ respectivamente. Tomando como referência os limites ocupacionais estabelecidos, onde a média anual é de 20 mSv por ano (ICRP 103, 2007). Levando em consideração o ponto máximo de exposição para o monitor de radiação pessoal MRAD 111, Ultra Radac, o número de escaneamentos necessário para não ultrapassar o limite anual para indivíduos ocupacionalmente expostos é de aproximadamente 18.000 escaneamentos por ano. Assim, a referência de quantidade de escaneamento para indivíduos do público devido a exposição no ponto de maior valor, utilizando a dose equivalente ambiente de 1,12 $\mu\text{Sv}/\text{scan}$, não atinja o limite de 1 mSv/ano é de aproximadamente 900 escaneamentos por ano.

Tabela 9: Taxas de dose equivalente ambiente [$\mu\text{Sv}/\text{h}$], para RadEye PRD-ER (A) e MRAD 111 (B).

Ponto	Modelo	Grupo 1	Grupo 2
1	A	$10,28 \pm 2,0$	$15,43 \pm 3,1$
	B	$61,71 \pm 18,5$	$51,43 \pm 15,4$
2	A	$10,28 \pm 2,0$	$10,28 \pm 2,0$
	B	$159,43 \pm 48,0$	$267,42 \pm 80,2$
3	A	$15,43 \pm 3,1$	$15,43 \pm 3,1$
	B	$97,71 \pm 29,3$	$82,28 \pm 24,7$
4	A	$10,28 \pm 2,0$	$10,28 \pm 2,0$
	B	$576,00 \pm 173$	$457,71 \pm 137$
5	A	$15,43 \pm 3,1$	$15,43 \pm 3,1$
	B	$82,28 \pm 24,7$	$46,28 \pm 14,0$

Os valores das taxas de dose equivalente ambiente apresentado na Tabela 9 indicam atenção para a necessidade da segurança radiológica, principalmente para pessoal da manutenção dos equipamentos que poderão estar próximos dos cinco pontos estudados. Os valores das taxas de doses equivalentes ambiente, quando comparados ao limite derivado para indivíduos ocupacionalmente expostos (10 $\mu\text{Sv/h}$), no ponto de interesse com taxa de 576 $\mu\text{Sv/h}$ no ponto 4 da Figura 32 (ver Tabela 9), ultrapassa o limite derivado em aproximadamente 60 vezes.

5.2. Valores da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ fora da área controlada

O equipamento SpiR-ID foi utilizado nos pontos conforme Figura 34, onde verificou-se a taxa de dose nos pontos (A, B, C, D, E, F, G, H). As taxas de doses equivalente ambiente, localizadas fora da área de controle de radiação, foram baixas, valor máximo de 0,23 $\mu\text{Sv/h}$, e não puderam ser distinguidas da radiação natural de fundo. O estudo de campo em uma instalação com equipamento HCPV4029, mostra que não há riscos de saúde ocupacional e todos estão seguros nas regiões externas à área controlada.

Tabela 10: Descrição dos Pontos e taxa de doses equivalente ambiente fora da área de varredura.

Ponto	Descrição dos Pontos	Taxa $H^*(10)[\mu\text{Sv/h}]$
A	Entrada do canal de inspeção	0,16
B	Atrás da barreira de atenuação do feixe	0,10
C		0,13
D		0,12
E	Saída do canal de inspeção	0,14
F	Atrás da barreira de atenuação do feixe	0,11
G		0,12
H		0,10

5.3. Valores da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ na cabine do caminhão

A proteção dos motoristas decorrentes de suas atividades de trabalho é uma questão importante, e de como gerenciar os perigos e riscos associados às atividades que estão

inevitavelmente ligados à possível exposição à radiação ionizante durante a verificação de contêineres.

Neste estudo foi verificado a exposição do motorista dirigindo o caminhão, veículo pelo qual será escaneado com indicativo de exposição por radiação espalhada, equipamento modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV. O motorista deve dirigir o caminhão em baixa velocidade dentro do canal de varredura como mostra a Figura 34 e por meio dos sensores do canal de escaneamento o início de transmissão do feixe de fótons de raios X formando o campo de radiação, começa automaticamente depois que a cabine do caminhão passa pelos sensores.

A instrumentação escolhida (equipamento SpiR-ID) para a investigação da taxa de dose equivalente ambiente no motorista em tempo real (Tabelas 11 e 12), forneceu um novo conjunto de dados dosimétricos, com especial ênfase no tempo em que ocorreu o escaneamento conforme a movimentação da cabine, se afastando do feixe espalhado.

Tabela 11: Taxa H*(10) no interior da cabine do caminhão, campanha 1.

Evento	Registro	Tempo (s).	Taxa H*(10)[μ Sv/h]	Nível de Público 0,5 μ Sv/h
1	BG	0,089	0,224	Abaixo
2	BG	0,193	0,179	Abaixo
3	BG	0,584	0,143	Abaixo
4	BG	1,086	0,314	Abaixo
5	ESPALHAMENTO	1,853	16,433	Acima
6	ESPALHAMENTO	2,355	19,946	Acima
7	ESPALHAMENTO	2,797	19,176	Acima
8	ESPALHAMENTO	3,275	18,257	Acima
9	ESPALHAMENTO	3,726	16,189	Acima
10	ESPALHAMENTO	4,183	13,806	Acima
11	ESPALHAMENTO	5,277	11,379	Acima
12	ESPALHAMENTO	5,702	9,436	Acima
13	ESPALHAMENTO	6,190	7,549	Acima
14	ESPALHAMENTO	6,618	6,273	Acima
15	ESPALHAMENTO	7,106	5,018	Acima
16	ESPALHAMENTO	7,513	4,014	Acima
17	ESPALHAMENTO	8,008	3,212	Acima
18	ESPALHAMENTO	8,433	2,569	Acima
19	ESPALHAMENTO	8,936	2,055	Acima
20	ESPALHAMENTO	9,336	1,644	Acima
21	ESPALHAMENTO	10,108	1,315	Acima
22	ESPALHAMENTO	10,597	1,052	Acima
23	ESPALHAMENTO	11,017	1,076	Acima
24	ESPALHAMENTO	11,577	1,042	Acima
25	ESPALHAMENTO	11,999	0,833	Acima
26	ESPALHAMENTO	12,466	0,667	Acima
27	ESPALHAMENTO	12,885	0,533	Acima
28	ESPALHAMENTO	13,348	0,427	Abaixo
29	ESPALHAMENTO	13,781	0,341	Abaixo
30	ESPALHAMENTO	14,236	0,273	Abaixo
31	BG	14,672	0,218	Abaixo
32	BG	15,180	0,175	Abaixo
33	BG	15,953	0,140	Abaixo

Tabela 12: Taxa H*(10) no interior da cabine do caminhão, campanha 2.

Evento	Registro	Tempo (s)	Taxa H*(10)[μ Sv/h]	Nível de Público 0,5 μ Sv/h
1	BG	0,062	0,226	Abaixo
2	BG	0,112	0,181	Abaixo
3	BG	0,497	0,145	Abaixo
4	BG	1,004	0,316	Abaixo
5	ESPALHAMENTO	1,397	16,455	Acima
6	ESPALHAMENTO	1,908	21,228	Acima
7	ESPALHAMENTO	2,322	22,445	Acima
8	ESPALHAMENTO	2,915	20,146	Acima
9	ESPALHAMENTO	3,679	18,247	Acima
10	ESPALHAMENTO	4,178	15,398	Acima
11	ESPALHAMENTO	4,574	12,816	Acima
12	ESPALHAMENTO	5,075	10,657	Acima
13	ESPALHAMENTO	5,490	8,526	Acima
14	ESPALHAMENTO	5,970	7,031	Acima
15	ESPALHAMENTO	6,379	6,107	Acima
16	ESPALHAMENTO	6,878	4,885	Acima
17	ESPALHAMENTO	7,306	4,138	Acima
18	ESPALHAMENTO	7,804	3,31	Acima
19	ESPALHAMENTO	8,595	2,904	Acima
20	ESPALHAMENTO	9,210	2,323	Acima
21	ESPALHAMENTO	10,042	1,859	Acima
22	ESPALHAMENTO	10,549	1,687	Acima
23	ESPALHAMENTO	10,944	1,35	Acima
24	ESPALHAMENTO	11,446	1,08	Acima
25	ESPALHAMENTO	11,851	0,864	Acima
26	ESPALHAMENTO	12,344	0,691	Acima
27	ESPALHAMENTO	12,746	0,553	Acima
28	ESPALHAMENTO	13,259	0,442	Abaixo
29	ESPALHAMENTO	14,098	0,354	Abaixo
30	ESPALHAMENTO	14,584	0,283	Abaixo
31	BG	14,989	0,226	Abaixo
32	BG	15,460	0,181	Abaixo
33	BG	16,016	0,164	Abaixo

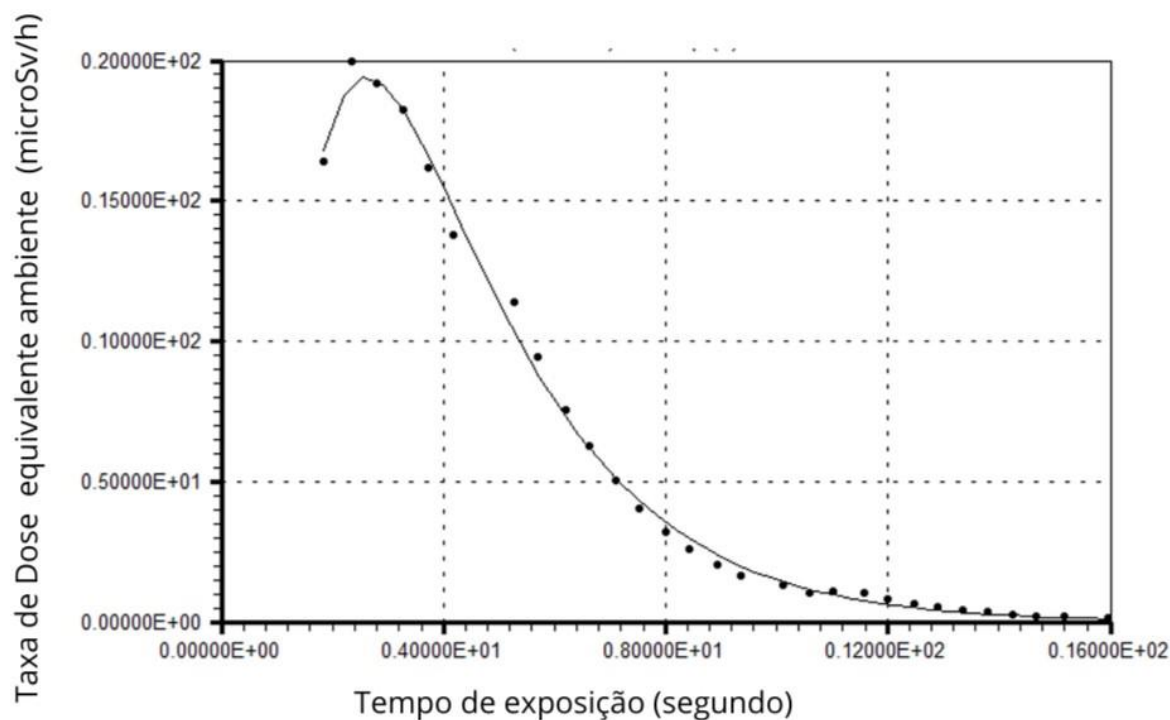


Figura 38: Comportamento da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ [microSv/h], campanha 1.

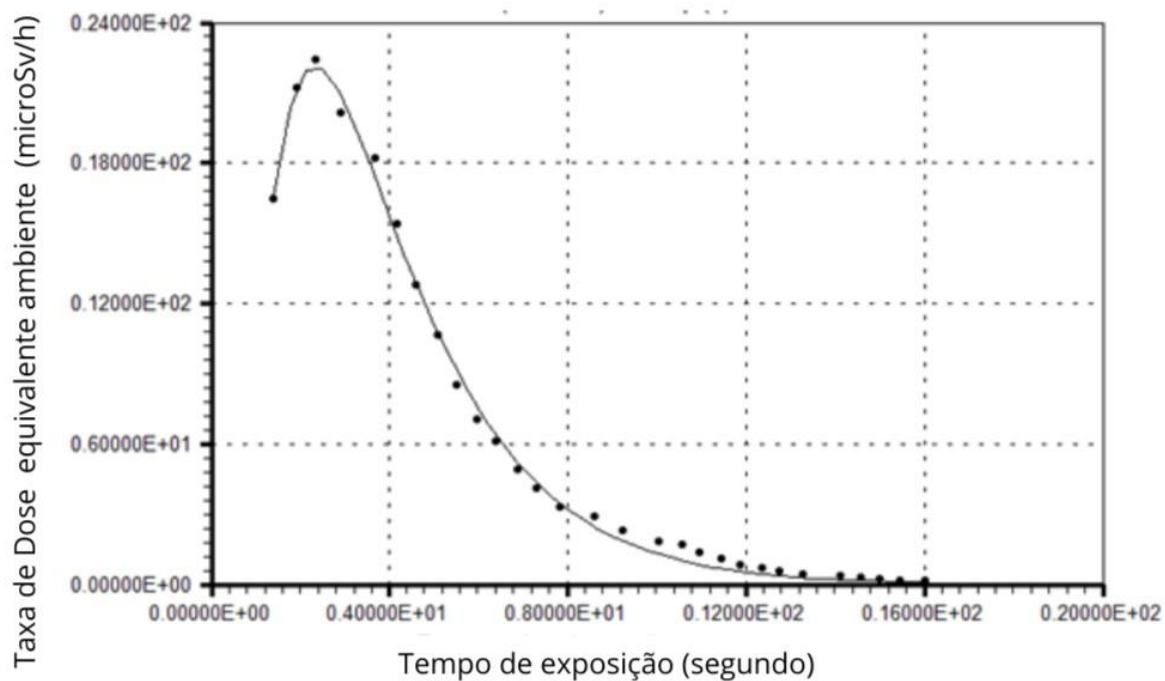


Figura 39: Comportamento da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ [microSv/h], campanha 2.

Verifica-se nas Tabelas 11 e 12, e Figuras 38 e 39, o comportamento da taxa de dose equivalente ambiente $H^*(10)$ [μ Sv/h], nas campanhas 1 e 2, o tempo que o motorista ficou acima do valor derivado para o público ($0,5 \mu$ Sv/h) a radiação espalhada aproximadamente de

9 segundos (tempo próximo do período total de varredura), apresentando pico no valor aproximadamente de 22 $\mu\text{Sv/h}$ (campanha 2), em torno de um segundo após o início do feixe transmitido, após este momento a taxa cai exponencialmente como visto nas Figura 38 e 39. Considerando o maior valor de 22 $\mu\text{Sv/h}$ e tempo de exposição de 9 segundos, a dose equivalente máxima, resulta em 0,055 μSv durante a varredura, o que significa que o procedimento de varredura de alta energia descrito pode ser repetido inúmeras vezes sem qualquer risco adicional de exposição à saúde dos motoristas. Levando em consideração a dose equivalente, o número de escaneamentos necessários para não ultrapassar o limite anual para indivíduos do público de 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007), é superior a 18.000 escaneamentos.

Os valores de doses recebidas na cabine do motorista por passagem fornecido pelo fabricante (manual do equipamento), está na faixa de 0,065 $\mu\text{Sv/escan}$ (dose máxima recebida por escaneamento utilizando a maior energia do equipamento). No presente estudo a dose equivalente resultou em 0,055 $\mu\text{Sv/escan}$. O valor encontrado é próximo do fornecido pelo fabricante.

Um incidente também pode ocorrer se o mecanismo de intertravamento como os sensores de início de exposição apresentar mau funcionamento possibilitando começar prematuramente, expondo a cabine do caminhão, junto com o motorista. Advento da falta de manutenção dos sistemas de segurança do escâner ou se os operadores não estiverem seguindo os procedimentos de segurança.

5.4. Taxa da dose equivalente ambiente no canal de passagem do caminhão.

A taxa média da dose equivalente ambiente $H^*(10)[\mu\text{Sv/h}]$ medida dentro da instalação de inspeção de cargas e containeres para equipamento modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV, nos sete pontos indicados na Tabela 13 e conforme Figura 34, onde o equipamento ficou a uma altura de um metro e vinte centímetros do solo durante a varredura do container que levou aproximadamente nove segundos. Utilizando o medidor SpiR-ID para

as medições ponto a ponto do feixe devido a radiação espalhada, que varia devido ao incremento da distancia de um metro entre os pontos de medição.

Tabela 13: Descrição da taxa de dose equivalente para os sete pontos de monitoração (Figura 34) dentro da área controlada para o equipamento SpiR-ID.

Ponto	Descrição dos Pontos	Tipo de Feixe	Taxa média de dose equivalente ambiental ($\mu\text{Sv/h}$)	Taxa máxima dose equivalente ambiental ($\mu\text{Sv/h}$)
J	Ao lado do feixe de transmissão	Espalhado	172,0	200,0
K	Distante um metro do feixe de transmissão	Espalhado	99,40	113,0
L	Distante dois metros do feixe de transmissão	Espalhado	60,70	72,60
M	Distante três metros do feixe de transmissão	Espalhado	37,90	43,20
N	Distante quatro metros do feixe de transmissão	Espalhado	9,68	11,10
O	Distante cinco metros do feixe de transmissão	Espalhado	7,58	8,74
P	Distante seis metros do feixe de transmissão	Espalhado	5,69	7,48

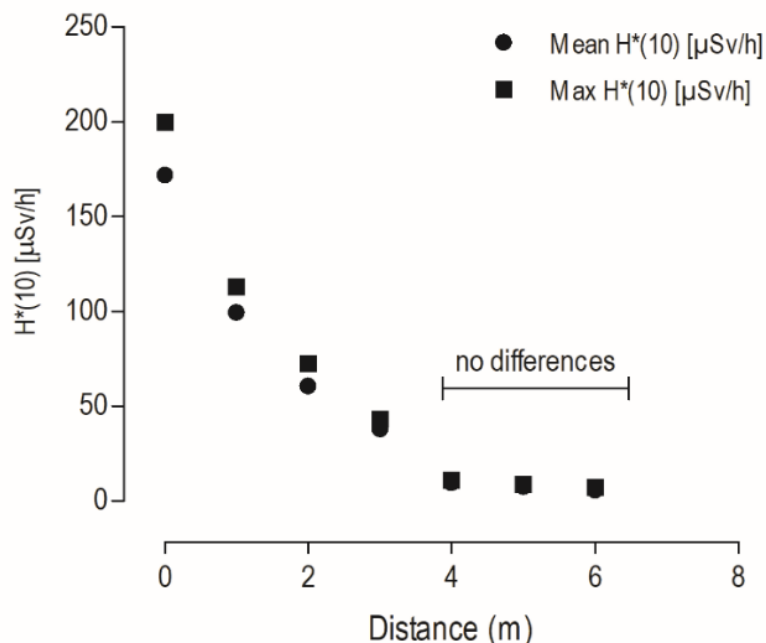


Figura 40: Medida da taxa de dose equivalente ambiental em sete pontos do canal de passagem do caminhão, valor médio (Mean) e máximo (Max).

Portanto, para o levantamento das medidas no canal de passagem do caminhão nos setes pontos indicados na Figura 34 [pontos J a P] e representado na Tabela 13 e Figura 40. Fornece informações inéditas e importante em caso de circunstâncias imprevistas. Os valores encontrados das taxas de dose equivalente ambiente conforme Figura 34, serão estimadas para fins de auditoria e estimativa de dose em caso de acidentes dentro da área controlada. As taxas de dose equivalente ambiente nos pontos indicados no canal de inspeção de container cai exponencialmente após o distanciamento do feixe de transmissão. Importante verificação foi que apartir de 5 metros do feixe de transmissão o valor já se encontra abaixo de 10 µSv/h, (ver Tabela 13).

5.5. Comparativo entre a equivalente de dose ambiente para feixe transmitido e exposições a radiações conhecidas pelos seres humanos

De acordo com o trabalho *Las Radiaciones em vida Cotidiana* da autora Lourdes Torres, na Universidade Nacional de Cuyo, existe no planeta lugares que superam as

exposições em práticas com uso de radiação ionizante, devido a composição de seu solo por apresentar isótopos como urânio, tório e seus derivados em sua cadeia de decaimento. Como exemplo na cidade Ramsar, situada na costa do Mar Cáspio, no Iran, onde a dose média anual é de 135mSv. Realizando uma comparação com a dose média na cidade Ramsar e levando em consideração o ponto maior dose por escaneamento com o uso do equipamento MRAD 111 (Tabela 8), tem-se 120.751 escaneamentos para equiparar a dose média anual na cidade Ramsar.

No mesmo trabalho de *Las Radiaciones em vida Cotidiana* da autora Lourdes Torres, foi apresentado a média anual de 125 mSv, para a cidade Poços de Caldas em Minas Gerais, Brasil. Levando em consideração o ponto de maior dose por escaneamento com o uso do equipamento MRAD 111 (Tabela 8), tem-se 111.806 escaneamentos para equiparar a dose média anual em Poços de Caldas.

De acordo com o Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR), a radiação natural expõe uma pessoa, em média, a uma dose de 2,4 mSv por ano. Comparando com o ponto de maior exposição por escaneamento (Tabela 8) tem-se, para o equipamento MRAD 111 o número de escaneamento será de 2.146 escaneamentos para atingir a radiação média natural por ano.

Conforme dados publicados Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR), uma pessoa é normalmente exposta a cerca de 200 μ Sv durante a viagem de ida e volta entre Tóquio e Nova York. Fazendo uma relação com o ponto de maior exposição para o equipamento MRAD 111, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 178 escaneamentos para equiparar a dose média entre a viagem de ida e volta entre Tóquio e Nova York. Conforme UNSCEAR, uma pessoa recebe uma dose de 600 μ Sv em um exame de raios X abdominal e fazendo uma comparação com o ponto de maior exposição para o equipamento MRAD 111, usando o ponto de maior dose por escaneamento (Tabela 8), o número será de 536 escaneamento para equiparar a dose média recebida em um exame de Raios X abdominal. E para um exame de tomografia computadorizada onde a dose em média é de 6.900 μ Sv, o número de escaneamento para o ponto de maior exposição para o equipamento MRAD 111, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 6.171 escaneamento para equiparar a dose média recebida em um exame de tomografia computadorizada.

Conforme a publicação do Comitê sobre Radiação Ionizante (ComRadI) dentro do Departamento de Imagem do Hospital Israelita Albert Einstein (COMRAD, 2009). Estabelece a dose efetiva em alguns métodos de radiologia diagnóstica e intervencionista e compara com dose efetiva recebida por radiações de fontes naturais de radiação. Na Tabela 14 é apresentado comparativo de dose utilizando o dado do equipamento MRAD 111, usando o ponto de maior dose por escaneamento (Tabela 8).

Tabela 14: Relação comparativa de exames, exposição natural e escaneamento no ponto do feixe transmitido.

Exame	Dose Efetiva	Comparação com a Dose efetiva recebida de fontes naturais de radiação	Número de escaneamento, análise com o equipamento MRAD 111: 1,12 μ Sv/escan
Radiografia de Tórax (PA)	0,02 mSv	2,4 dias	17 escaneamentos
Radiografia de Crânio	0,07 mSv	8,5 dias	60 escaneamentos
Radiografia de Coluna Lombar	1,3 mSv	158 dias	1.102 escaneamentos
Radiografia de Extremidade	0,001 mSv	< 1 dia	1 escaneamentos
Urografia Excretora	1,6 mSv	6 meses	1.356 escaneamentos
Uretrocistografia Miccional	5-10 anos: 1,6 mSv	6 meses	1.356 escaneamentos
	Crianças > 10 anos: 0,8 mSv	3 meses	678 escaneamentos
Exame do Trato GI superior	3,0 mSv	1 ano	2.542 escaneamentos
Enema opaco	7,0 mSv	2,3 anos	5932 escaneamentos
Tomografia Computadorizada de Crânio	2,0 mSv	8 meses	1.695 escaneamentos
Tomografia Computadorizada dos seios da face	0,6 mSv	2 meses	508 escaneamentos
Tomografia Computadorizada do Tórax	8,0 mSv	3 anos	6.780 escaneamentos
Tomografia Computadorizada do Abdômen	10 mSv	3,3 anos	8.475 escaneamentos
Mamografia	0,7 mSv	3 meses	593 escaneamentos

O ser humano está exposto à radiação ionizante proveniente de fontes naturais e artificiais. As fontes de radiação natural são raios cósmicos, radionuclídeos das séries do Urânio e do Tório que existem no solo (OKUNO, 2010). É oportuno comparar os valores de dose por escaneamento com as doses decorrente de exposição externa e interna por agentes radioativos naturais. A dose efetiva de radiação cósmica que o tripulante de uma empresa aérea que voa 600 horas anuais é de aproximadamente 2 a 5 mSv/ano (ICRP-132, 2016). A “United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,” estima que estes valores variam entre 1,2 à 7 mSv/ano. Conforme publicação do UNSCEAR 2017 a radiação

natural expõe uma pessoa, em média, a uma dose efetiva de 2,4mSv/ano. Este valor é decorrente da exposição externa e interna a agentes radioativos naturais, devido a exposição externa de raios cósmicos onde a média é de 0,4 mSv/ano, acrescido da exposição externa de raios gama terrestre onde a média é 0,5 mSv/ano, somando a exposição interna, devido a inalação principalmente de radônio que contribui em média uma dose de 1,2 mSv/ano e devido a ingestão que contribui em média uma dose 0,3 mSv/ano (UNSCEAR, 2010). Segundo a publicação UNSCEAR 2017 Report, a dose efetiva anual média nos residentes rurais em Poços de Caldas no Estado de Minas Gerais foi estimada em 13 mSv/ano, com o intervalo típico de dose efetiva de 6 –16 mSv/ano. Conforme AQUINO, (2010). O valor da dose calculada para a localidade de Camburí , localizada no Espírito Santo, apresentou valores entre 1,2 à 3,5 vezes acima do limite de 1mSv/ano. A localidade conhecida como “Black Spot” na porção central da Praia da Areia Preta em Guarapari se destaca pela dose de 29 vezes acima da dose limite de 1mSv/ano. Fazendo um comparativo com a maior dose de escaneamento para análise com o equipamento MRAD 111, tem-se a Tabela 15.

Tabela 15: Relação entre exposições por radiação natural e exposição no ponto do feixe transmitido.

Referência	Dose Efetiva anual (mSv/ano)	Número de escaneamento. Análise com o equipamento MRAD 111: 1,12 μ Sv/escan	Referência por mês
Tripulante que voa 600 horas anuais	2 a 5	1.695 a 4.237 escan/ano	142 a 353 escan/mês
Estimativa UNSCEAR de dose em tripulantes anualmente	1,2 a 7	1.017 a 5.932 escan/ano	85 a 494 escan/mês
Média por pessoa à radiação natural no mundo	2,4	2.034 escan/ano	170 escan/mês
Média anual de exposição externa por raios cósmicos	0,4	358 escan/ano	29 escan/mês
Média anual para exposição externa de raios gama terrestre	0,5	447 escan/ano	37 escan/mês
Média anual para exposição interna, devido a inalação principalmente de radônio	1,2	1.073 escan/ano	89 escan/mês
Média anual devido a ingestão	0,3	268 escan/ano	22 escan/mês
Média anual nos residentes rurais em Poços de Caldas	13	11.628 escan/ano	969 escan/mês
Média anual da praia da Areia Preta em Guarapari	29	25.939 escan/ano	2.162 escan/mês

Considerando as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) em sua publicação nº 103 (ICRP, 2007), para exposição uniforme de corpo inteiro a radiação do tipo raios X ou gama, uma dose aguda de 10 Gy pode resultar dentre outros efeitos globais em inflamação dos pulmões e morte. Doses maiores podem levar a efeitos que se apresentam no sistema nervoso e cardiovascular, podendo levar humanos a óbito em poucos dias. Se a dose (D) recebida de forma aguda estiver no $3 < D < 6$ Gy, pode ocorrer hemorragia, depilação e esterilidade temporária e permanente (ICRP, 2007). Na Tabela 16 é apresentado o intervalo de dose associada às síndromes e riscos de óbito para exposição de corpo inteiro e homogênea. e criando uma relação com o número de exposições no escâner de carga e contêineres.

Tabela 16: Relação entre dose letal para seres humanos em exposição de corpo inteiro e número de escaneamento no ponto do feixe transmitido.

Dose adsorvida no corpo todo (Gy)	Principal efeito que leva à morte	Tempo de vida até o óbito (dias)	Equivalente em Número de escaneamento (1,118 μ Sv/escan)
3 – 5	Dano na medula óssea	30 – 60	2.683.363 escan – 5.366.726 escan
5 – 15	Dano no trato gastrintestinal	7 – 20	5.366.726 escan – 13.416.815 escan
5 – 15	Dano nos pulmões e nos rins	60 – 150	5.366.726 escan – 13.416.815 escan
> 15	Dano no sistema nervoso	< 5, depende da dose	> 13.416.815 escan

Considera-se que para exposição à fótons (X ou gama) de corpo inteiro, tanto o fator de peso da radiação (W_R) quanto o fator de peso para tecido ou órgão (W_T) são tomados pela unidade ($W_{R,T} = 1$) (ICRP, 2007). Como os fatores de pesos são adimensionais, a grandeza dose absorvida (Gy) e dose efetiva (Sv) se equivalem.

Conforme a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), o limite de dose anual do público é de 1 mSv (1000 μ Sv) e, para os trabalhadores, a dose limite é 20 mSv por ano em uma média de 5 anos consecutivos, sendo que por ano não pode ultrapassar 50 mSv. Note que o limite de dose não inclui a exposição à radiação natural ou médica. Desta forma o número de escaneamento no ponto de maior exposição para o equipamento MRAD 111, usando o ponto de maior dose por escaneamento (Tabela 8), o número será de 894 escaneamento para equiparar o limite máximo anual para o público. Para o indivíduo ocupacionalmente exposto, considerando 20 mSv por ano em uma média de 5 anos consecutivos, tem-se para o equipamento MRAD 111, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número resulta em 17.889 escaneamentos, para equiparar o limite recomendado pela ICRP anual para o IOE.

Em sua publicação nº 103 (ICRP, 2007) a ICRP gerou dados experimentais utilizando aceleradores lineares (Linacs) estabelecendo uma estimativa dos limiares de dose para reações teciduais no testículo, ovário, cristalino e medula óssea de humanos adultos. Na Tabela 17 é apresentada uma relação destes dados com as doses geradas no escâner tomadas neste estudo.

Tabela 17: Relação entre estimativa dos limites de dose única e aguda, e número de exposições por escaneamento.

Tecido e Efeito	Limiar de dose		Equivalente em Número de Escaneamentos (1,118 μ Sv/escan)
	Dose Única (Gy)	Aguda	
<i>Testículos (esterilidade)</i>			
temporária	0,15		134.168
permanente	3,5 – 6,0		3.130.590 – 5.366.726
<i>Ovários</i>			
esterilidade	2,5 – 6,0		2.236.135 – 5.366.726
<i>Cristalino</i>			
opacidade detectável	0,5 – 2,0		447.227 – 1.788.908
catarata	5,0		4.472.271
<i>Medula Óssea</i>			
depressão hematopoiética	0,5		447.227

5.6. Descrição de cenários e dose equivalente ambiente estimada, sob o ponto de vista de proteção radiológica

Utilizando o valor de maior equivalente de dose ambiente (Tabela 8), observado entres os pontos críticos de maior probabilidade de dose e superestimando um erro de 30%, erro máximo para o monitor de radiação tipo Geiger Muller, verificam-se as doses estimadas para cada cenário (ver Tabela 18).

Tabela 18: Cenário, evento indicador, consequências e dose ambiente estimada.

Cenário	Evento indicador	Consequências	Maior equivalente de dose ambiente estimada, com incremento de 30% (Figura 32) (μ Sv/escan)	
1	Perda da visualização das imagens geradas pelas câmeras de vídeo nos monitores da sala de controle	Não visualização da entrada e saída dos veículos e pessoas na instalação, podendo haver exposição desnecessária de pessoas	Ponto 1	0,16
			Ponto 2	0,40
			Ponto 3	0,24
			Ponto 4	1,45
			Ponto 5	0,20
2	Ativação do acelerador sem o desconto linear no comprimento da boleia	Falha na visualização da imagem radiográfica e/ou na passagem do caminhão com o acelerador ativo, gerando exposição direta do motorista	Ponto 4	1,45
3	Não funcionamento do sistema de intertravamento no momento de acioná-lo	Ocorrência de exposição de IOE ou IP	Ponto 1	0,16
			Ponto 2	0,40
			Ponto 3	0,24
			Ponto 4	1,45
			Ponto 5	0,20

5.7. A análise para a investigação da dose equivalente ambiente, utilizando dosímetros de área durante cinco anos consecutivos

A radioproteção ocupacional é uma preocupação essencial para aqueles envolvidos em atividades que envolvem exposição à radiação ionizante, como a verificação de contêineres. Gerenciar os perigos e os riscos associados a essas atividades é fundamental para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores. Nesse sentido, uma análise quantitativa e qualitativa da dose equivalente ambiente (conforme apresentado nas Tabelas 19 e 21) foi conduzida em duas instalações de inspeção com equipamento modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV, fornecendo dados dosimétricos na área. Esses dados são importantes para uma melhor gestão de riscos e para o desenvolvimento de estratégias de radioproteção eficazes. É essencial que as referências apropriadas sejam mantidas para garantir a precisão das informações apresentadas e para fornecer confiabilidade aos resultados obtidos.

Tabela 19: Relação de número de escaneamento ano e dose equivalente ambiente acumulada utilizando dosímetros de área, para instalação A.

Número de escaneamento por ano mês de Janeiro (instalação A)					
Janeiro	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	10023	8302	10924	11988	11638
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Janeiro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,7	0,7	0,9	1	1,9
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Fevereiro (instalação A)					
Fevereiro	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	8614	9759	10052	12057	11283
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Fevereiro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,9	0,9	1,3	0,6	0,9
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Março (instalação A)					
Março	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	9973	11122	11761	13616	11404
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Março distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,7	0,6	1,2	1,5	1
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Abril (instalação A)					
Abril	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	10457	10509	10847	13704	11238
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Abril distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	1,3	0,7	1,1	1,3	1,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR

ANR = leitura Abaixo do Nível de Registro

Número de escaneamento por ano mês de Maio (instalação A)					
Maio	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	9532	10086	10793	14394	11639
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Maio distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,6	0,6	0,5	1,2	0,8
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Junho (instalação A)					
Junho	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	10985	11791	9988	11560	9906
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Junho distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,6	0,8	0,5	1,4	1,5
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Julho (instalação A)					
Julho	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	10880	12063	10632	9774	11328
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Julho distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	1	1	0,6	0,9	1,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Agosto (instalação A)					
Agosto	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	12099	11641	11527	10838	11278
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Agosto distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,7	1,6	0,8	1,5	1,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR

ANR = leitura Abaixo do Nível de Registro

Número de escaneamento por ano mês de Setembro (instalação A)					
Setembro	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	9933	11748	11540	12492	11413
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Setembro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	1	0,7	1,1	1	0,6
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Outubro (instalação A)					
Outubro	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	10758	12096	13077	11556	12541
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Outubro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	1,1	1,2	0,4	0,7	1,4
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Novembro (instalação A)					
Novembro	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	11174	10475	13258	11809	9444
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Novembro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,8	1,2	0,5	1,1	0,9
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Dezembro (instalação A)					
Dezembro	2018	2019	2020	2021	2022
escaneamento	11368	10431	13273	11828	11109
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Dezembro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,6	0,5	0,7	1,3	1,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR

ANR = leitura Abaixo do Nível de Registro

Tabela 20: Dose equivalente ambiente acumulada por número de escaneamento, para instalação A.

Resumo Instalação A:					
Ano	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de Escaneamento anual	125796	130023	137672	145616	134221
Dose acumulada anual (mSv)	10	10,5	9,6	13,5	13,8
Dose por escaneamento anual (mSv/escan)	7,94938E-05	8,07549E-05	6,9731E-05	9,27096E-05	0,00010282
Média de Escaneamento anual nos últimos 5 anos					
134665,6					
Média μSv/escan nos últimos 5 anos					
0,085 μ Sv/escan					

Tabela 21: Relação de número de escaneamento ano e dose equivalente ambiente acumulada utilizando dosímetros de área, para a instalação B.

Número de escaneamento por ano mês de Janeiro (instalação B)					
Janeiro	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	1846	5897	4378	4636	2431
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Janeiro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,3	0,4	0,4	0,6	0,1
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Fevereiro (instalação B)					
Fevereiro	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	1755	4621	4752	4045	1837
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Fevereiro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,4	ANR	0,2	0,4	0,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Março (instalação B)					
Março	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	3300	4549	3940	5412	2067
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Março distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,4	0,3	0,2	0,4	0,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Abril (instalação B)					
Abril	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6771	4017	3911	3987	1805
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Abril distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	1,1	ANR	0,5	0,2	ANR
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR

ANR = leitura Abaixo do Nível de Registro

Número de escaneamento por ano mês de Maio (instalação B)					
Maio	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6046	5307	4044	3444	2216
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Maio distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,5	0,5	0,2	0,3	0,4
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Junho (instalação B)					
Junho	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	5407	5271	3698	4001	1519
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Junho distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,6	0,3	0,2	0,4	0,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Julho (instalação B)					
Julho	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6455	6097	4007	3348	1847
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Julho distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,7	0,3	0,3	0,4	0,1
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Agosto (instalação B)					
Agosto	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6750	6073	5209	2915	1834
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Agosto distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,6	0,7	0,6	0,1	0,1
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR

ANR = leitura Abaixo do Nível de Registro

Número de escaneamento por ano mês de Setembro (instalação B)					
Setembro	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6344	5574	4930	2566	1762
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Setembro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Outubro (instalação B)					
Outubro	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6082	5231	5710	2429	2035
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Outubro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,5	0,6	0,2	0,2	0,1
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Novembro (instalação B)					
Novembro	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6669	4954	4687	2445	2113
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Novembro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,6	0,2	0,5	0,5	0,2
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
Número de escaneamento por ano mês de Dezembro (instalação B)					
Dezembro	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de escaneamento	6473	4285	5601	3044	1682
Dose equivalente ambiente acumulada [mSv] no mês de Dezembro distribuído anualmente					
EXTRA 1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 4	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR
EXTRA 5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1
EXTRA 6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR

ANR = leitura Abaixo do Nível de Registro

Tabela 22: Dose equivalente ambiente acumulada por número de escaneamento, para instalação B.

Resumo Instalação B:					
Ano	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de Escaneamento anual	63898	61876	54867	42272	23148
Dose acumulada anual (mSv)	6,7	4	3,9	4	1,9
Dose por escaneamento anual (mSv/escan)	10,4855E-05	6,46454E-05	7,1081E-05	9,46253E-05	8,2081E-05
Média de Escaneamento anual nos últimos 5 anos					
49212,2					
Média $\mu\text{Sv}/\text{escan}$ nos últimos 5 anos					
0,083 $\mu\text{Sv}/\text{escan}$					

Com mais de 180 mil (134.665,6 na instalação A e 49.212 na instalação B) escaneamentos os dosímetros de área (Extras 1, 2, 3, 4 e 6) distribuídos externamente às instalações A e B, apresentam valores abaixo do Nível de Registro (ANR), o qual é estabelecido como sendo 0,1mSv ao mês. Com aproximadamente 200 mil escaneamentos abaixo do ANR, não se espera tendência de variação desse padrão. Isso indica que as áreas externas são seguras para trabalhadores e indivíduos do público. As referências utilizadas para a realização do estudo foram as diretrizes estabelecidas pela CNEN e pelos órgãos competentes.

O dosímetro extra 5 foi fixado em um ponto estratégico para medir a dose integrada durante todo o processo de escaneamento. Isso significa que o dosímetro registrou a radiação espalhada durante o tempo de varredura e, portanto, representa uma medida extrapolada de dose equivalente para a proteção radiológica. É importante ressaltar que essa simulação a cabine do motorista não se movimentou durante todo o deslocamento e que as doses médias por escaneamento nas instalações A e B foram de 0,085 $\mu\text{Sv}/\text{escan}$ e 0,083 $\mu\text{Sv}/\text{escan}$, respectivamente.

Essas doses médias são consideradas muito baixas e comprovam que o procedimento de varredura de alta energia pode ser repetido inúmeras vezes sem representar risco adicional de exposição à saúde dos motoristas. Isso reflete o compromisso com a segurança e a cultura

de proteção radiológica adotada nas instalações e reforça a importância de práticas seguras em ambientes radiológicos.

Para garantir que a instalação A não ultrapasse o limite anual de dose de 1 mSv/ano para indivíduos do público, são necessários 11.751 escaneamentos (considerando um ponto fixo) (CNEN NN. 3.01; 2014). No entanto, é importante notar que durante o uso diário do escâner, a cabine se move e a distância do motorista para o equipamento é variável. De acordo com a lei do inverso do quadrado da distância, os valores de dose por escaneamento para o motorista são significativamente menores que para um ponto fixo.

O fabricante do equipamento forneceu informações sobre as doses de radiação que o motorista recebe na cabine durante a operação. Segundo o manual, a dose máxima recebida por escaneamento utilizando a maior energia do equipamento está na faixa de 0,065 μ Sv/escan. Verificou-se que, para atingir uma dose anual de 1mSv, o motorista deverá passar pela cabine do equipamento 15.384 vezes ao ano. Este resultado foi validado em um estudo que comparou a movimentação da cabine com a operação em um ponto fixo. As provas confirmaram a proximidade dos valores calculados, com resultados consistentes da pesquisa.

A CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) estabelece o valor de referência de 1mSv/ano para garantir a segurança dos equipamentos emissores de radiações ionizantes durante as operações. Isso assegura a proteção dos operadores, bem como do público em geral. De acordo com a NN 3.01 de 2014, a CNEN estabelece níveis de dose para determinar as ações a serem tomadas quando os níveis de registro, investigação, ação e intervenção são atingidos ou excedidos. Os resultados do estudo de caso apresentado não excederam os níveis de registro estabelecidos pela CNEN, obtidos por meio de um programa de monitoramento. Nenhum valor relevante foi detectado que justificasse o registro de uso dos cinco dosímetros passivos utilizados nos pontos Extra 1, 2, 3, 4 e 6

Contudo, a norma 3.01 item 5.4.3.1, afirma que:

“Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas

expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais. Nesse processo de otimização, deve ser observado que as doses nos indivíduos decorrentes de exposição à fonte devem estar sujeitas às restrições de dose relacionadas a essa fonte.”

Sob o ponto de vista do princípio primário de otimização e a demonstração nos dados fornecidos, a Otimização de um sistema de proteção radiológica é dispensável quando o projeto assegura que em condições normais de operação, se cumpram as seguintes condições, conforme item 5.4.3.3 da NN 3.01/CNEN:

- a) a Dose Efetiva anual média para qualquer IOE não excede 1 mSv;
(Este item é atendido no projeto de inspeção de segurança no HCVP).
- b) a Dose Efetiva anual média para indivíduos do grupo crítico não ultrapassa 10 μ Sv;
(Sabendo que para todos os IOE's em uma instalação apresentam valores abaixo do nível de registro e os levantamentos radiométricos mostram valores de background em torno da instalação, sabendo que conceito de grupo crítico é para público, este item é atendido no projeto de inspeção de segurança no HCVP).
- c) a Dose Efetiva coletiva anual não supera o valor de 1 pessoa.Sv.

A nível de exemplo, utilizou-se o seguinte cálculo de dose coletiva:

$$\begin{aligned} Dose\ coletiva &= (1000\ pessoas) \times \left(2000 \frac{h}{ano} \times 0,18 \frac{\mu Sv}{h} \right) \\ &= 0,36\ pessoa.Sv/ano \end{aligned}$$

Em que:

1000 pessoas: valor máximo atribuído aos indivíduos atuando próximo ao escâner em uma instalação de porto;

2000h/ano: carga de trabalho;

0,18 μ Sv/h: radiação de fundo.

Neste exemplo, o resultado do valor na análise de dose coletiva mesmo sendo levado ao extremo não ultrapassaria a condição imposta pela norma. Logo, este item é atendido no projeto de inspeção de segurança no HCVP.

5.8. Valores da dose equivalente ambiente integrada na cabine do motorista em inspeções de cargas e contêineres para sistema de inspeção HCVM (Heimann Cargo Vision Mobile)

Serão apresentados os resultados do estudo de campo em duas instalações (X e Y), que utilizam aceleradores para inspeção de cargas e contêineres, modelo HCVM – Mobile, com um tempo de escaneamento de carga aproximadamente de 35 s. Com objetivo de validar uma metodologia de escaneamento de contêineres utilizando escâneres móveis, que não exija o escaneamento de todo o caminhão, apenas da carga, conforme figura 36, evitando a irradiação da cabine do motorista e eliminando a necessidade de sair durante o processo.

A validação de uma metodologia de escaneamento de contêineres com escâneres móveis traz benefícios como segurança, eficiência e agilidade, preservando integridade dos condutores e cargas transportadas.

A instrumentação escolhida para a investigação da dose equivalente ambiente, forneceu um novo conjunto de dados dosimétricos confiáveis e inéditos, para equipamento HCVM - Mobile, através de uma análise quantitativa e qualitativa.

5.8.1. Dose equivalente integrada na cabine do motorista para operação HCVM, instalação X.

Conduzido em um sistema que utiliza um acelerador de partícula com energia máxima para os elétrons acelerados de 3,8 MeV, de fabricação Smiths Heimann, modelo HCVM-MOBILE, número de série 851524. Durante as atividades de medida *in loco* na instalação, foi utilizado um medidor tipo Câmara de Ionização, Fabricante: LUDLUM / Modelo: 9DP.

Neste estudo será mostrada a exposição na cabine do motorista do caminhão, veículo pelo qual a carga será escaneada com indicativo de exposição por radiação espalhada, conforme Figura 36. O início de transmissão do feixe de fótons de raios X forma um campo de radiação após a cabine do caminhão, isso garante que a cabine, com o motorista dentro,

não seja atingida pelo feixe direto, mas apenas o contêiner, com um tempo de escaneamento aproximadamente 35 s.

O instrumento de medição após os escaneamentos dos containers (em atividade ordinária de inspeção) foi removido para leitura. No total ocorreram 62 medidas em 3 dias.

Tabela 23: Cada valor representa a dose equivalente integrada na cabine do motorista para operação HCVM-Mobile.

Data da medição	Hora da medição	Câmara de Ionização (μSv)
17/10/2023	14:17	0,07
17/10/2023	14:57	0,06
17/10/2023	18:15	0,16
17/10/2023	18:49	0,18
18/10/2023	07:00	0,17
18/10/2023	08:10	0,06
18/10/2023	08:20	0,12
18/10/2023	08:32	0,11
18/10/2023	08:50	0,04
18/10/2023	08:54	0,03
18/10/2023	08:59	0,08
18/10/2023	09:02	0,05
18/10/2023	09:07	0,07
18/10/2023	09:12	0,07
18/10/2023	09:17	0,04
18/10/2023	09:23	0,09
18/10/2023	09:29	0,06
18/10/2023	09:40	0,03
18/10/2023	09:47	0,02
18/10/2023	13:02	0,07
18/10/2023	13:07	0,03
18/10/2023	13:12	0,06
18/10/2023	13:17	0,08
18/10/2023	13:22	0,05
18/10/2023	20:16	0,07
18/10/2023	20:45	0,05
18/10/2023	21:00	0,04
18/10/2023	21:12	0,03
18/10/2023	21:47	0,14
18/10/2023	21:52	0,16
18/10/2023	21:56	0,09
18/10/2023	22:04	0,2
18/10/2023	22:08	0,05
18/10/2023	22:11	0,09
18/10/2023	22:16	0,07
18/10/2023	22:24	0,09
18/10/2023	22:43	0,04
18/10/2023	22:51	0,06
18/10/2023	22:56	0,05
18/10/2023	23:03	0,07
18/10/2023	23:10	0,09
18/10/2023	23:45	0,05
19/10/2023	02:01	0,12

19/10/2023	02:15	0,06
19/10/2023	02:41	0,11
19/10/2023	02:48	0,08
19/10/2023	03:00	0,06
19/10/2023	03:10	0,09
19/10/2023	03:17	0,06
19/10/2023	03:24	0,12
19/10/2023	03:29	0,08
19/10/2023	04:00	0,12
19/10/2023	04:14	0,08
19/10/2023	04:35	0,09
19/10/2023	04:43	0,15
19/10/2023	04:52	0,09
19/10/2023	08:26	0,06
19/10/2023	08:51	0,05
19/10/2023	09:39	0,05
19/10/2023	10:31	0,08

Média:	0,08
Desvio Padrão:	0,08±0,04

Os valores para o motorista verificam-se na tabela 23, o comportamento da dose integrada equivalente ambiente $H^*(10)[\mu\text{Sv}]$, nas campanhas que ocorreram em 3 datas distintas. A média da dose equivalente integrada fica em, $0,08\mu\text{Sv}$ durante a varredura. Levando em consideração o valor da média, o número de escaneamentos necessário para não ultrapassar o limite anual para indivíduos do público de 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007), é de 12.500 escaneamento. Em caso de circunstâncias imprevistas, os valores encontrados da dose equivalente ambiente, serão estimadas para fins de auditoria e estimativa de dose em caso de acidentes dentro da área controlada. Considerando um único motorista para se atingir o limite do público será necessárias aproximadamente 34 passagens por dia durante os 365 dias do ano, o que torna virtualmente muito difícil atingir esta meta. Logo para atingir a dose do IOE seria necessárias 684 passagens por dia aproximadamente, tornando irreal este cenário. Logo, esta atividade pode ser considerada intrinsecamente segura, somente falha de operação pode justificar uma dose superior ao público. Neste caso o motorista pode ser considerado indivíduo do público do ponto de vista da radioproteção.

Levando em consideração outra análise remota de ocorrer, onde, um mesmo caminhoneiro passe 20 vezes pelo escâner de varredura por dia, em 5 dias por semana e 50 semanas no ano. Para uma dose de $0,08\mu\text{Sv}$ por varredura, tem-se uma dose anual de

400,0 μ Sv/ano ou 0,4mSv/ano, abaixo do limite de 1 mSv/ano (BRASIL, 2014) para indivíduo do público.

5.8.2. Dose equivalente integrada na cabine do motorista para operação HCVM, instalação Y.

Conduzido em um sistema que utiliza um acelerador de partícula com energia máxima para os elétrons acelerados de 3,8 MeV, de fabricação Smiths detection, modelo HCV-MOBILE, número de série 522.

Durante as atividades de medida *in loco* na instalação Y. Foi utilizado dois medidores, uma Câmara de Ionização e um Geiger Muller. Câmara de Ionização Fabricante: Fluke Biomedical / modelo: 451P e um Geiger-Muller fabricante: Thermo Scientific / Modelo: FH40 GL10.

O medidor foi colocado na cabine do motorista como mostra o esquema na Figura 36. Para cada valor de dose integrada apresentado na Tabela 24, ocorreu após 5 (cinco) medidas geradas, foi realizado a média dos cinco valores correspondentes, descontando a radiação de fundo. No total 50 (cinquenta) medidas em 10 dias.

Tabela 24: Cada valor representa a média realizada para cinco escaneamento, fornecendo a média da dose equivalente ambiente integrada.

Data	Câmara de Ionização (μ Sv)	Geiger Muller (μ Sv)
29/09/2023	0,033	0,047
30/09/2023	0,12	0,085
01/10/2023	0,069	0,172
02/10/2023	0,095	0,092
04/10/2023	0,085	0,037
05/10/2023	0,08	0,06
06/10/2023	0,121	0,089
08/10/2023	0,101	0,07
09/10/2023	0,071	0,055
10/10/2023	0,073	0,051
Média	0,085	0,076
Desvio Padrão	0,085\pm0,026	0,076\pm0,038

Os valores para o motorista verificam-se na tabela 24, o comportamento da dose integrada equivalente ambiente $H^*(10)[\mu\text{Sv}]$, nas campanhas que ocorreram em 10 datas distintas. A média da dose equivalente integrada fica respectivamente para Câmara de Ionização e Geiger Muller em, $0,085\mu\text{Sv}$ e $0,076\mu\text{Sv}$ durante a varredura. Levando em consideração o valor de $0,085\mu\text{Sv}$, o número de escaneamentos necessário para não ultrapassar o limite anual para indivíduos do público de 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007), é superior a 11.790 escaneamento. Para se atingir o limite do público sendo a necessário aproximadamente 32 passagens por dia durante os 365 dias do ano. Logo para atingir a dose do IOE seria necessária 646 escaneamento por dia aproximadamente, tornando irreal este cenário.

Levando em consideração outra análise remota de ocorrer, onde, um mesmo caminhoneiro passe 20 vezes pelo escâner de varredura por dia, em 5 dias por semana e 50 semanas no ano. Para uma dose de $0,085\mu\text{Sv}$ por varredura, tem-se uma dose anual de $424,0\mu\text{Sv/ano}$ ou $0,42\text{ mSv/ano}$, abaixo do limite de 1 mSv/ano (BRASIL, 2014) para indivíduo do público.

CAPÍTULO 6

Conclusão

Os perigos e riscos associados às atividades de Inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres, que estão inevitavelmente relacionados com a possível exposição de indivíduos do público e indivíduos ocupacionalmente expostos, às radiações ionizantes durante o processo de inspeção com radiação do tipo raios X são pequenos relacionados a outras práticas com uso de raios X na medicina e indústria. Os resultados mostraram que os riscos são baixos à saúde e segurança dos trabalhadores que atuam com a inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres, com uso de raios X de alta energia, para um acelerador de partícula do fabricante Smiths Heimann, modelo HCVP4029, de energia máxima 4,5 MeV, com uma carga horária de funcionamento de 24 horas por dia, 7 dias por semana e com um mínimo de 2 operadores por turno.

Com base nos resultados apresentados neste trabalho pode se concluir que:

- I. A exposição a radiações ionizante durante o processo de inspeção por escaneamento é pequena.
- II. Com a instrumentação SpiR-ID, para investigação da dose equivalente ambiente no motorista em tempo real, o maior valor de pico foi de 22 $\mu\text{Sv/h}$. A dose equivalente máxima, fica em cerca de 0,055 μSv durante a varredura, o que significa que o procedimento de varredura pode ser repetido inúmeras vezes sem qualquer risco adicional de exposição à saúde dos motoristas.
- III. Levando em consideração a dose equivalente de 0,055 μSv , o número de escaneamentos necessários para não ultrapassar o limite anual para indivíduos do público de 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007), é superior a 18.000 escaneamentos para o motorista.
- IV. Os valores de doses recebidas na cabine do motorista por passagem fornecido pelo fabricante (manual do equipamento), está na faixa de 0,065 $\mu\text{Sv/escan.}$

Valor que se encontra é muito próximo do fornecido pelo fabricante, validando os resultados.

- V. As taxas de dose equivalente ambiente nos pontos indicados no canal de inspeção de container cai exponencialmente após o distanciamento do feixe de transmissão. Importante verificação foi que a partir de 5 metros do feixe de transmissão o valor já se encontra abaixo de $10 \mu\text{Sv/h}$.
- VI. A instalação A teve uma média de 134.665,6 escaneamentos por ano, enquanto a instalação B teve uma média de 49.212,2 escaneamentos por ano. Mesmo com um número elevado de escaneamentos, os cinco pontos indicados nos dosímetros de área não mostraram valores acima do nível de registro. Isso indica que as áreas externas são seguras para todos.

Para equipamentos HCVM-Mobile, é possível estabelecer uma metodologia para equipamentos que operem no modo Móvel sem a necessidade de escanear a cabine do motorista e sem aumentar as doses de radiação espalhada. Dessa forma, o serviço de inspeção pode ser otimizado, aplicando procedimentos seguros e eficientes.

É importante saber que a quantidade de raios X emitidos enquanto um veículo é escaneado no equipamento modelo HCVM-Mobile é baixa dentro da cabine do motorista. Considerando a carga operacional da instalação fica impossível o motorista ultrapassar o limite de público.

Portanto é evidente que a preocupação com a segurança radiológica na inspeção de veículos, tem sido levada em consideração na implementação do equipamento HCVM-Mobile. A garantia que o motorista não será exposto ao feixe direto de raios X, mas apenas o contêiner, reforça a operação segura no que diz respeito a proteção radiológica. Além disso, medidas como a realização de levantamentos semanais de estimativas de doses e a inclusão de um dosímetro ambiental para verificação das doses mensais, podem ser adotadas para garantir o acompanhamento das doses por inspeção.

Com base nesse estudo pode-se concluir que:

- I. A média da dose equivalente integrada para as instalações X e Y, fica em, $0,08 \mu\text{Sv}$ durante a varredura. Levando em consideração o valor da média, o número de escaneamentos necessário para não ultrapassar o limite anual para

indivíduos do público de 1 mSv/ano (ICRP 103, 2007), é superior a 12.500 escaneamentos.

Assim, pode-se concluir que a inspeção de um veículo não representa qualquer perigo para o motorista mesmo que sejam efetuadas de forma consecutiva. Este modelo, proporciona uma melhor eficiência e confiabilidade nas inspeções, garantindo a qualidade e segurança no processo.

Constatações

- I. O Monitor de Radiação Pessoal Modelo MRAD 111, Ultra Radac, a equivalente de dose ambiente varia entre 1,118 $\mu\text{Sv}/\text{escan}$ (máximo) e 0,121 $\mu\text{Sv}/\text{escan}$ (mínimo), entre os cinco pontos de maior criticalidade de dose, conforme Tabela 8.
- II. Levando em consideração o ponto máximo de maior exposição (ponto 4 feixe direto transmitido, Tabela 8) para o monitor de radiação pessoal MRAD 111, Ultra Radac, o número de escaneamento necessário para não ultrapassar o limite anual para Indivíduos Ocupacionalmente Exposto é de 17.889 escaneamento.
- III. A quantidade de escaneamento para indivíduos do público devido a exposição no ponto de maior valor (ponto 4, feixe direto transmitido, Tabela 8), utilizando a equivalente de dose ambiente de 1,118 $\mu\text{Sv}/\text{escan}$, não atinja o limite de 1 mSv/ano é de no máximo 894 escaneamentos.
- IV. Para o equipamento SpiR ID colocado no ponto 1, ocorreu a saturação do cintilador, muito semelhante ao que ocorreu com o equipamento Rad Eye PRD-ER.
- V. Os valores de equivalente de dose ambiente integrada por ponto descrito com medidor cintilador Rad Eye PRD-ER, apresentaram valores muito abaixo. Resultado da saturação do medidor cintilador.
- VI. Os valores de equivalente de dose ambiente integrada por ponto descrito com medidor Geiger Muller MRAD 111 - Ultra Radac, são diferentes do cintilador e o Geiger Muller apresentam conformidade com o esperado.
- VII. Referente ao equipamento monitor tipo Cintilador e monitor tipo Geiger Muller, no uso da prática em tela nesta tese, conclui-se que o Cintilador saturou. Gerando um subdimensionamento da dose equivalente recebida naquele período de investigação, porque o cintilador saturou, nos levando a erros de interpretação.
- VII. Comparando com o ponto de maior exposição por escaneamento tem-se para análise com o equipamento Ultra Radc, o número de 2.146 escaneamento para equiparar com a dose média anual de 2,4 mSv por ano.

- VIII. Para análise com o equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 178 escaneamentos para equiparar a dose média entre a viagem de ida e volta entre Tóquio e Nova York.
- IX. Para análise com o equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 536 escaneamento para equiparar a dose média recebida em um exame de Raios X abdominal. Para um exame de tomografia computadorizada o número será de 6.171 escaneamento para equiparar a dose média recebida em um exame de tomografia computadorizada.
- X. A Dose Efetiva de radiação cósmica que os tripulantes de uma empresa aérea que voa 600 horas anuais é de aproximadamente 2 a 5 mSv/ano, comparando com a dose gerada no equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 1.695 a 4.237 escan/ano ou 142 a 353 escan/mês, para equiparar.
- XI. A estimativa de dose para tripulantes anualmente varia entre 1,2 e 7 mSv/ano. Comparando com a dose gerada no equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 1.017 a 5.932 escan/ano ou 85 a 494 escan/mês, para equiparar.
- XII. Usando o ponto de maior dose por escaneamento e comparando com a cidade de Ramsar, onde a dose anual é de 135 mSv, o número de escaneamento será de 120.751, para equiparar a dose média anual na cidade de Ramsar. Para a cidade Poços de Calda no estado de Minas Gerais o número será de 111.806 escaneamentos para equiparar a dose média anual de 125mSv na cidade.
- XIII. A dose absorvida associada a mortes de seres humanos com dano na medula óssea é de 3 a 5 Gy, comparando com o número de escaneamento para o equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 2.683.363,1 escan à 5.366.726,3 escan.
- XIV. A dose absorvida associada a mortes de seres humanos com dano no trato gastrintestinal ou danos nos pulmões ou nos rins é de 5 a 15 Gy, comparando com o número de escaneamento para o equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de 5.366.726,3 escan à 13.416.815,7 escan.

- XV. A dose absorvida associada a mortes de seres humanos com dano no sistema nervoso é para dose maiores que 15 Gy, comparando com o número de escaneamento para o equipamento Ultra Radc, usando o ponto de maior dose por escaneamento, o número será de no mínimo 13.416.815,7 escan.
- XVI. Os resultados apresentados da equivalente de dose ambiente para os cinco pontos descritos são de grande valia em casos de eventos como:
- i. Em caso do equipamento (acelerador de partícula) não desligar;
 - ii. Em caso de exposição acidental do Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) ou Indivíduo do Público (IP);
 - iii. Se por algum motivo o dosímetro cair no chão na área controlada ficando exposto aos fótons;
 - iv. Ocorrência de Acidente no Canal de Passagem (pista durante transporte rodoviário);
 - v. Em caso de exposição acidental do indivíduo do público na cabine do caminhão;
 - vi. Em caso de exposição acidental do indivíduo do público no interior do contêiner ou carga;
 - vii. Em caso de falha no sistema de câmeras de vídeo com ocorrência de exposição de pessoas;
 - viii. Em caso de presença de pessoas dentro da área controlada;
 - ix. Em caso de falha nos monitores de radiação portáteis;
 - x. Em caso de falha de comunicação entre sala de comando e área externa possibilitando exposição de indivíduos;
 - xi. Em caso de falha no monitor fixo de área;
 - xii. Em caso de pane nos sistemas luminosos e sonoros;
 - xiii. Em caso de falha na blindagem
 - xiv. Em caso de falha no sistema de intertravamento;
- XVII. Durante cinco (5) anos consecutivos, foram utilizados seis (6) dosímetros de área (Figura 35). Os dosímetros extras 1, 2, 3, 4, e 6 nas instalações foram lidos como zero, exceto o dosímetro extra 5, que está dentro da área controlada e está na direção da cabine do motorista.

- i. A existência de muitos dosímetros em locais onde a leitura é zero é redundante, uma vez que um levantamento radiométrico regular identificaria qualquer dose nestes locais. A quantidade de dosímetros espalhados pela instalação também causa um ônus desnecessário.
- ii. O dosímetro extra 5 foi fixado em um ponto estratégico para medir a dose integrada durante todo o processo de escaneamento. Isso significa que o dosímetro recebeu todo o espalhamento de radiação durante o tempo de varredura e, portanto, representa uma medida extrapolada de dose equivalente para a proteção radiológica. As doses médias por escaneamento nas instalações A e B foram de $0,085\mu\text{Sv/escan}$ e $0,083\mu\text{Sv/escan}$, respectivamente.
- iii. Os supervisores de proteção radiológica credenciados pela CNEN têm um papel importante na avaliação e mensuração dos dados, classificando as áreas e identificando os pontos críticos no levantamento radiométrico no acelerador de partículas. O levantamento radiométrico mensal em torno da área supervisionada é uma parte essencial da rotina de análise de dados, conforme estabelecido no plano de radioproteção autorizado pela CNEN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, Reginaldo R. *Avaliação da Radioatividade Natural em Areias das Praias da Grande Vitória, Espírito Santo*. 2010. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. São Paulo, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Informes Técnicos:** Resolução Nº 263 – *Estabelece, nos termos da Lei n. 13.874/2019 e o Decreto n. 10.178/2019, a classificação, em termos do nível de risco, dos atos públicos de liberação de instalações e atividades sob controle regulatório da CNEN e suas as hipóteses de solicitação*. Brasília, 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. GUIA - CNEN. Divisão de Aplicações Industriais-DIAPI/CGMI/DRS, *Guia de Licenciamento de Instalações de Inspeção de Bagagem e Contêineres do Subgrupo 7C*. Brasília, 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Informes Técnicos:** Posição Regulatória CNEN NN 3.01 – *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Informes Técnicos:** Posição Regulatória CNEN NE 3.02 – *Serviço de Proteção Radiológica*. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Informes Técnicos:** Posição Regulatória CNEN-NN-6.02. *Licenciamento de Instalações Radiativas*. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Brasília, maio. de 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. GUIA - CNEN. Divisão de Aplicações Industriais-DIAPI/CGMI/DRS, *Guia de Licenciamento de Instalações de Inspeção de Bagagem e Contêineres*. Brasília, 2015.

- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-15. *Atividades e Operações Insalubres*. Brasília, Dez de 2011.
- BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. *Diretrizes para o desenvolvimento da cooperação técnica Internacional multilateral e bilateral/ Ministério das Relações Exteriores*. Brasília, 2ª ed. Fev. de 2005.
- BENNETT, Allison C.; CHIN, Yi Z. *100% Container Scanning: Security Policy Implications for Global Supply Chains*. Submitted to the Engineering Systems Division in partial fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Logistics at the Massachusetts Institute of Technology. June 2008.
- CHEN, Gongyin et al. *Linatron mi6, the x-ray source for cargo inspection*. Physics Procedia, v. 66, p. 68-74. Agus. 2015.
- COMRAD, Comitê sobre Radiação Ionizante. *Radiação Ionizante nos Estudos Radiológicos*. ALBERT EINSTEIN – Hospital Israelita. Julho, 2009.
- GOMES, Renato G.; *Modelagem computacional de acelerador linear e de Instalação de inspeção de bagagem e contêiner*. Tese Doutorado. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, RJ. 2020.
- GOMES, Rogério S. et al. *Dose to drivers during drive-through cargo scanning using geant4 monte carlo simulation*. International Nuclear Atlantic Conference - INAC. Recife, PE. 2013.
- GROFF, Cláudia et al. *Condições de Proteção Radiológica em uma Instalação com Acelerador Linear de Elétrons na prática de inspeção de Segurança de Cargas e Contêineres*. Trabalho de conclusão de curso- Faculdade Casa Branca – FACAB. Casa Branca, 2017.
- HUPE, O., & ANKERHOLD, U., 2007, X-ray security escâner s for personnel and vehicle control: dose quantities and dose values. European journal of radiology, 63-2, 237-241.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards*. — Vienna: IAEA, GSR – Part 3, 2014.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation Biology: A Handbook for Teachers and Students*. IAEA Training Course Series 42. Vienna, 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations*. Publication No. 109, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Safety Culture: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group*, Safety Series. — Vienna: IAEA, INSAG – N° 75, 1991.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation*, Safety Guide RS-G-1.3, 1999.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Publication No. 103, 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Publication No. 60, 1991

ICRP. **Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation**. In: ICRP Publication 132. V. 45, n. 1., p. 1-49. 2016.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA - IRD. Laboratórios Certificados para Prestação de Serviço de Monitoração Individual Externa. Desenvolvida por Comitê de Avaliação de Serviços de Ensaio e Calibração. CASEC/IRD/CNEN, 2018. Disponível em: <<http://www.ird.gov.br/index.php/casec/send/9-casec/113-casec-laboratorios-dosimetria-certificados-julho-2018>> Acesso em 04 Fevereiro 2020.

KHAN M.S., NICHOLAS E.P. AND TERPILAK, S.M., 2004, Radiation Dose Equivalent to Stowaways in vehicle, *Health Physics*,86 (5), 483-492.

- KNOLL G.F., *Radiation detection and Measurements, Third Edition*. (J. Wiley & Sons, 1989).
- LIMA, C. A. 2006. *Avaliação da performance dos detetores Iodeto de Sódio NaI (Tl) em centrais nucleares. (Tese de Doutorado)*. Rio de Janeiro (RJ): Universidade federal do Rio de Janeiro, 2006. 109p.
- LOURENÇO, Manoel J. M.; Crispim, Verginia R. (Orient.); Melo, Paulo F. F. (Orient.). *Análise das Condições de Proteção e Segurança Radiológicas das Instalações com Aceleradores de Partículas na Área de Pesquisa no Brasil*. 2010. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.
- MESQUITA, A. A. P., *O papel e o funcionamento das Agências Reguladoras no contexto do Estado brasileiro: Problemas e soluções*. Revista de Informação Legislativa. Brasília a. 42 n. 166 abr./jun. 2005
- NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS – NCRP, RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENT ISSUES RELATED TO CARGO SCANNING WITH ACCELERATOR – PRODUCED HIGH-ENERGY X RAYS No. 20, 2007.
- ONONOGBO, C. P., G. O. AVWIRI, AND E. T. KOMOLAFE. External Ionizing Radiation Exposure during Cargo/Vehicle Radiographic Inspection of Nigerian Ports Authority, Onne, Rivers State, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science* 5.11: 1-9, 2015.
- OKUNO E., YOSHIMURA E. M., *Física das Radiações*. São Paulo: Oficina de Texto, 2010.
- PRLIĆ, IVICA, MLADEN HAJDINJAK, AND ZDRAVKO CEROVAC, Scientific Study on External Ionising Radiation Exposure during Cargo Vehicle Radiographic Inspections. 2012
- REED W. A., *X-ray cargo screening systems: the technology behind image quality*. Product Manager, Varian Medical Systems Inc., Security & Inspection Products, Las Vegas, NV, USA, fev. 2011.

RIBAS R. V., *Instrumentação Nuclear*. Instituto de Física, Departamento de Física Nuclear – USP, fevereiro de 2020.

SILVA FILHO, W.S.; PELEGRINELI, S.Q. *Descrição de eventos em instalação radiativa de inspeção de segurança de cargas e contêineres rodoviários*. **Brazilian Journal of Health Review - BJHR**, Vol. 3, No 3, pag. 5963-5972, 2020. Disponível em: <<http://www.brazilianjournals.com/index.php/BJHR/article/view/11254>>, acesso em: 07 de Jun. 2020.

SMITHS DETECTION., *securing vulnerable sea and land borders*. <<https://www.smithsdetection.com/market-sectors/ports-borders/>>, acesso em: 08 de Out. 2020.

SYED N. A., *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Elsevier, Oxford, UK, 2007, First Ed.

TAUHATA L.; et al. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 10ª revisão*. Rio de Janeiro. IRD/CNEN. Abril de 2014.

TORRES L., *Las Radiaciones em vida Cotidiana*. Universidad Nacional de CUYO – NCUYO. 2019.

UNSCEAR. General Assembly. Key resolutions of the Assembly. Disponível em <https://www.unscear.org/unscear/en/general_assembly.html>. Acesso em: 01 de Nov. de 2019.

UNSCEAR – THE UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. V. 1. New York, 2010.

UNSCEAR 2017 Report – THE UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York, March 2018.

VMI SECURITY. Disponível em: <https://vmisecurity.com/pt-br/spectrum-cargo/> Acesso em 19 Nov. 19.

ANEXO 1: CONTEÚDOS COMPLEMENTARES

DESENVOLVIDOS

Período de Calibração dos Medidores

Introdução:

Um monitor de radiação é um detector construído e adaptado para finalidades específicas e por isso são importantes para Proteção Radiológica devido ao fato de ser humano não possuir sensores para a radiação ionizante no nosso corpo. Assim, um monitor de radiação tem como objetivo a medição de grandezas e parâmetros para fins de controle ou de avaliação da exposição à radiação, incluindo a interpretação dos resultados (CNEN 3.01).

Uma vez definido o tipo de operação, o detector escolhido passa a fazer parte da gestão de sistemas de medição para garantir a confiabilidade da medição. A confiabilidade de um instrumento de medição é comprovada por meio de calibração que é realizada por meio de um processo de comparar os valores medidos pelo instrumento, com valores de um padrão.

Este período de calibração dos instrumentos de medição pode ser estabelecido pelo fabricante, por normas ou pelo serviço de proteção radiológica se forem observadas alterações no funcionamento. Todas estas informações são especificadas no Plano de Proteção Radiológica. Sabe-se que o PPR deve descrever todas as informações dos medidores de radiação, incluído um histórico das calibrações.

Sendo assim, com base em um estudo de caso, foram realizadas pesquisas em normas e guias da CNEN para avaliar a necessidade do período de calibração dos medidores de radiação aplicados em Inspeção de Segurança de Cargas e Container.

Desenvolvimento

A instalação de Inspeção de Segurança de Bagagem e Container está classificada como SUBGRUPO 7C - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe de fótons de raios X, de acordo com a Norma da CNEN NN-6.02:2020 (Brasil, 2020).

Segundo o Guia para o licenciamento de instalações radiativas de inspeção de bagagem e contêineres do subgrupo 7C, essas instalações devem prezar por uma avaliação de segurança sempre completa e prevê que o quadro estrutural do sistema de proteção radiológica contenha:

“descrição dos sistemas de segurança, que devem ser concebidos considerando os critérios de independência, redundância e diversidade. Além disso, quaisquer defeitos nesses componentes devem impedir o funcionamento do escâner e sistemas associados, até que o defeito seja consertado. A documentação apresentada deve descrever todos os sistemas de segurança com os detalhes de suas lógicas de funcionamento e localização pretendida. (GUIA CNEN, 2023)”

Fica evidente o estímulo quanto a cultura de segurança (redundância, diversidade e independência) dos dispositivos.

Com isto, sensores são usados para manter a segurança no fluxo de inspeção com relação a lógica de intertravamento do sistema de segurança. São sensores infravermelhos, foto sensitivo e *loop* indutivo que são inseridos ao longo da pista de inspeção e usados para detectar a posição do veículo na pista de escaneamento. A indicação pode ser vista no console de comando ou por câmera. Estes sensores são intertravados com a emissão do feixe de Raios X que sai do acelerador com o objetivo de controle de fluxo de inspeção para garantir segurança ao processo. Entendesse que os medidores fazem parte de um sistema de segurança, onde a redundância, diversidade e independência são ajustadas nos dispositivos concebidos nas instalações de bagagens e contêineres.

Conforme recomendação do Guia, todas estas informações são detalhadas no Plano de Proteção Radiológica.

Além disso, o Guia recomenda que um dos requisitos do Plano de Proteção Radiológica seja a descrição dos medidores de radiação da instalação e o período de calibração.

O anexo 1, item V, página 21, a seguinte orientação em relação aos medidores de radiação:

“Devem ser descritos somente os medidores de radiação que permanecem na instalação. A instalação deve contar com pelo menos 02 (dois) medidores de radiação portáteis permanentes. Esses medidores não podem ser substituídos por medidores de radiação fixos de área ou monitores de radiação do tipo Bip. Todos os medidores de radiação devem ser calibrados anualmente por um laboratório de metrologia acreditado pela CNEN, conservando-se os respectivos registros. (GUIA CNEN, 2023)”

Com base neste trecho, fica evidente que uma instalação radiativa de Inspeção e Segurança de Cargas e Containers, deve possuir 2 medidores permanentes com calibração realizada anualmente.

Resultado e Discussão

A apresentação dos resultados baseia-se no estudo de caso das instalações de Inspeção de Segurança de Bagagem e Container classificada como SUBGRUPO 7C - Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe de fótons de raios X. Realizando uma busca em normas estabelecidas pela CNEN, a tabela 1 apresenta um panorama geral quanto ao quantitativo de instalações radiativas, as áreas de atuação para os quais a CNEN certifica a qualificação de supervisores de proteção radiológica, os cuidados com Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE), público e meio ambiente, se a prática utiliza fonte selada, não selada ou equipamento gerador de radiação, quantitativos de medidores exigidos e tempo de calibração.

Tabela 25: Panorama geral das principais instalações radiativas com seus modos de operação

Instalação Radiativa	Quantidade de instalações	Classe de atuação		Cuidado com público, IOE e ambiente		Emissor de radiação ionizante			Quantidade de medidores	Período de calibração (ano)
		Classe 1	Classe 2	Contaminação	Irradiação	Fonte selada	Fonte não selada	Gerador de radiação		
Medicina Nuclear	450	X		X	X		X		2	2
Radioterapia	275		X	X	X	X		X	1	2
Perfilagem de Poços	10		X	X	X	X			4	2
Inspeção de Bagagem e Containeres	64	X			X			X	2	1
Distribuidor de Radiofármacos	4	X		X	X	X	X		3	2
Produção de Radioisótopos (Ciclotron)	11	X		X	X	X	X		2	2
Radiofarmácia	3	X		X	X		X		3	2

De acordo com a Tabela 25, pode-se observar que as instalações que possuem o risco de contaminação e irradiação, que atuam com fonte não seladas cumprem com requisito de terem no mínimo dois medidores com período de calibração de dois anos. Enquanto, as instalações radiativas com risco somente de irradiação, com equipamentos emissores de raios x, devem cumprir o requisito de possuir dois medidores com períodos de calibração de um ano.

Vale enfatizar que, não há definido ou registrado em normas, os critérios que determinam em quais períodos os medidores devem ser calibrados, mesmo tendo o mesmo objetivo de operação. Sabe-se que a decisão de quando calibrar e com que frequência, deve ser tomada por alguém (ou por uma equipe) que tenha experiência no método, no uso do instrumento, na formação técnica ou conhecimento técnico, na busca de informações de outros laboratórios (empresas) a respeito do instrumento. Além disso, uma calibração dependerá, por exemplo, do instrumento, condições de uso, criticidade dos valores, vida útil, entre outros fatores.

É importante ressaltar que para realizar a gestão de um sistema de medição é necessário que um programa de controle de qualidade e manutenção dos medidores seja definido, juntamente com o Plano de Proteção Radiológica. Este programa tem o objetivo de gerenciar o risco de que o instrumento e os processos de medição possam produzir resultados incorretos afetando a confiabilidade dos resultados. Além disso, garante que os processos de suporte necessários, tais como verificações, manutenções e ajustes do sistema (quando necessário) são confiáveis. Para este fim, alguns métodos estatísticos podem ser utilizados para avaliação dos resultados.

Na sequência serão apresentados os gráficos de controle que apresentam os resultados do estudo de caso. Estes dados referem-se aos testes de aferição utilizando uma fonte padrão de Cs¹³⁷ do tipo puntiforme. As leituras foram corrigidas para a data inicial da aferição tomada como a data de referência. Os testes foram realizados por medidores de diferentes modelos e marcas, semanalmente no levantamento radiométrico da cabine do motorista como mencionado no Plano de Proteção Radiológica e foram obtidos durante os anos de 2021 e 2022 em 3 instalações diferentes, classificadas como instalações ALFA, BETA e GAMA.

A análise dos resultados descreve por métodos estatísticos o comportamento e o desempenho dos medidores. Para os limites superior e inferior foi utilizada a incerteza de 20% do valor medido. Os fabricantes de medidores tipo Geiger Muller conforme especificação

apresenta acurácia como controle da garantia de desempenho do medidor de 30% do valor medido. Em nosso estudo foi utilizado incerteza de 20% do valor medido, abaixo do apresentado pelo fabricante.

As figuras 41, 42 e 43 apresentam os resultados dos testes de aferição pelo medidor do tipo Geiger, marca APVL, modelo FH 40 G-10 Ω , número de série 24530, durante o ano de 2021 com 231 aferições (leituras) e 2022 com 237 aferições (leituras) da instalação ALFA.

Na Figura 41, os dados obtidos no ano de 2021 evidenciam que os pontos se mantiveram entre o limite superior (2,46 μ Sv/h) e limite inferior (1,64 μ Sv/h) de controle, ambos calculado a partir do valor da aferição inicial de 2,05 μ Sv/h como sendo o valor de referência dentro dos $\pm 20\%$ das leituras. Todas as leituras foram corrigidas para a data da primeira aferição como referência. A figura 2 os dados foram obtidos no ano de 2022, os pontos se mantiveram entre o limite superior (2,42 μ Sv/h) e limite inferior (1,61 μ Sv/h) nos meses de Janeiro a Agosto antes da calibração. A figura 3 apresenta os resultados das leituras após a calibração nos meses de Outubro a Dezembro, com limite superior (2,94 μ Sv/h) e limite inferior (1,96 μ Sv/h), ambos calculado a partir do valor da aferição inicial de 2,45 μ Sv/h como sendo o valor de referência dentro dos $\pm 20\%$ das leituras.

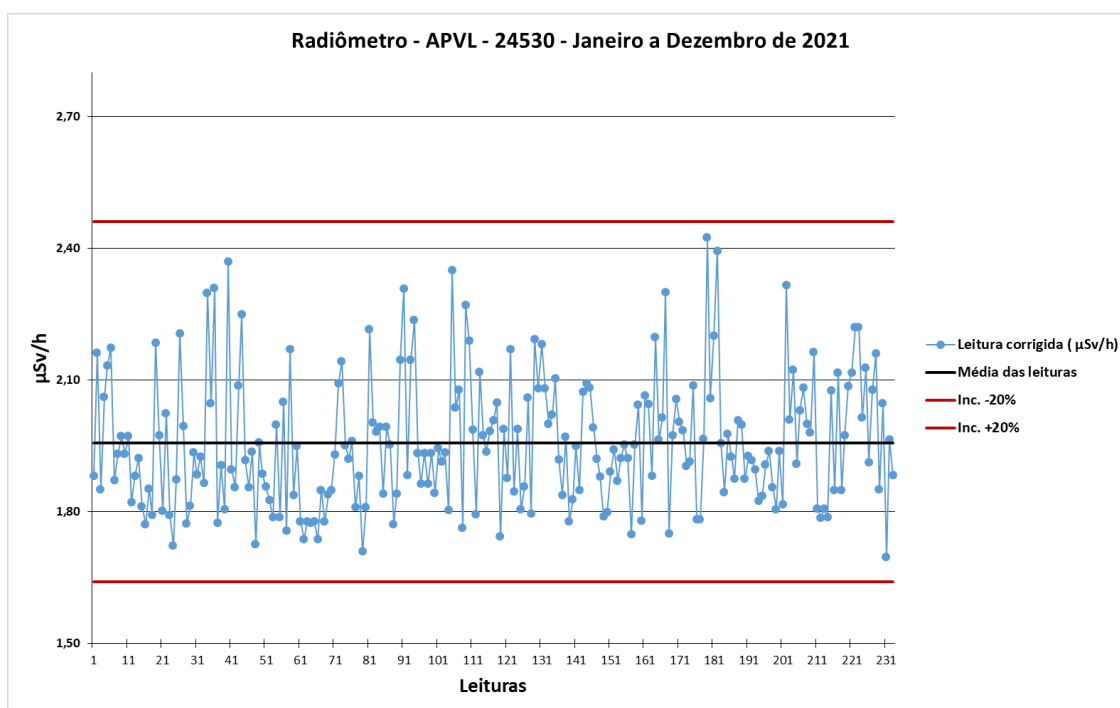


Figura 41: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Dezembro (2021) – Instalação ALFA equipamento APVL .

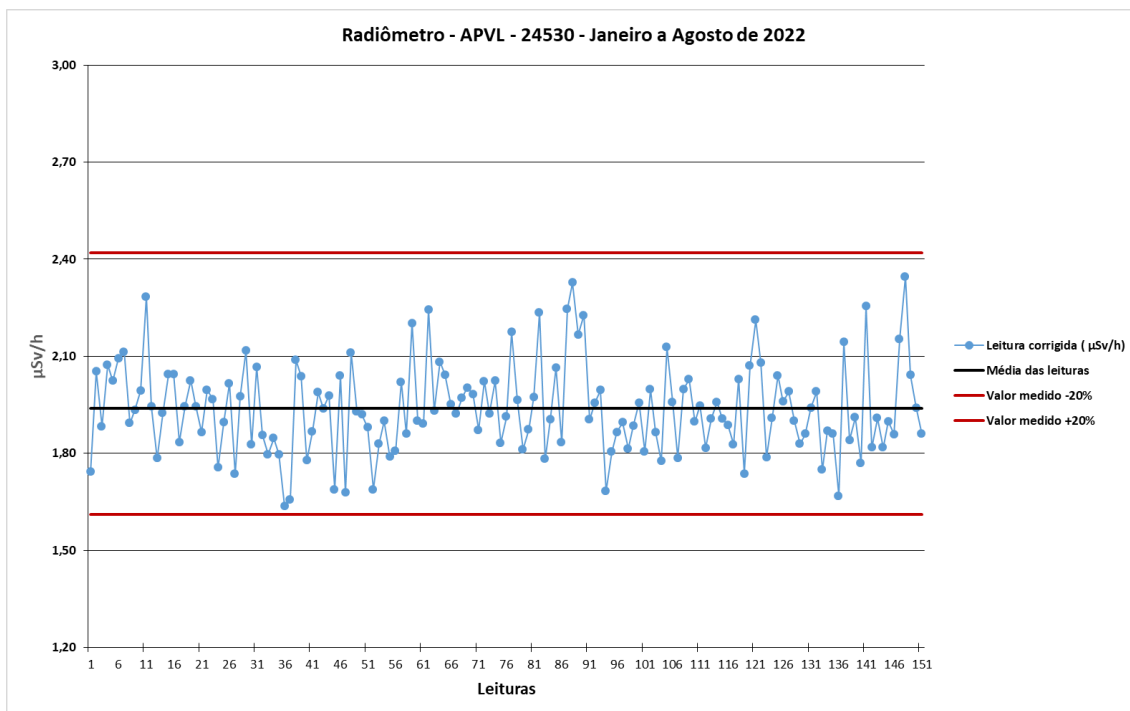


Figura 42: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Agosto (2022) – Instalação ALFA equipamento APVL

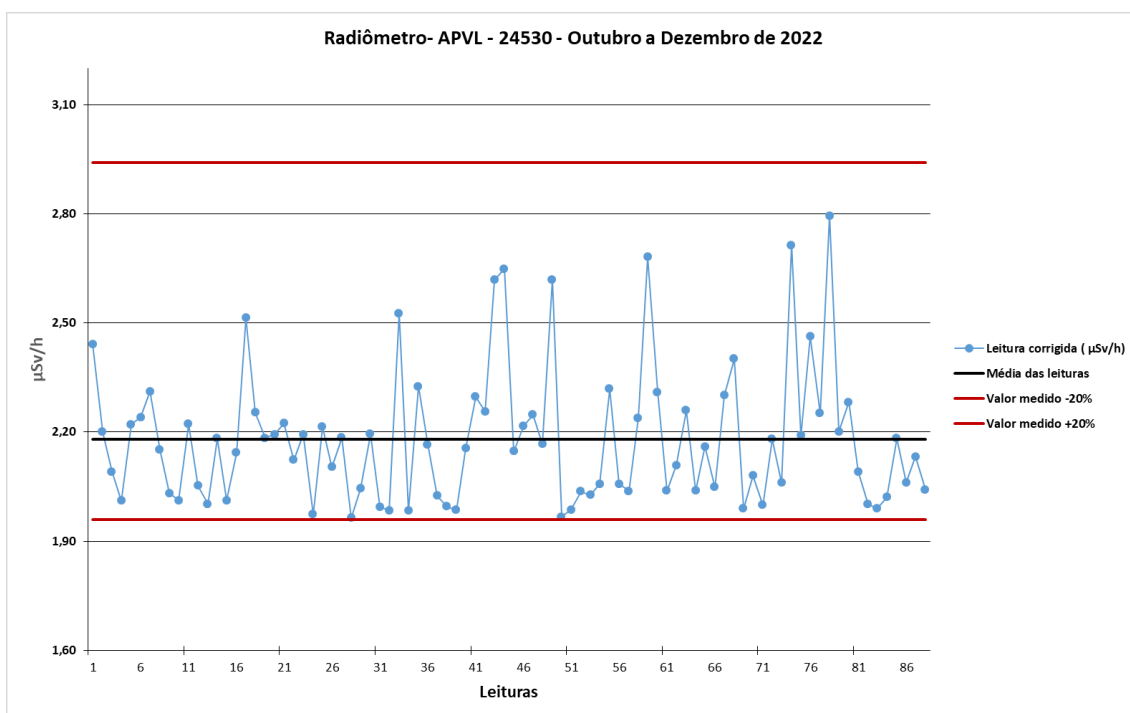


Figura 43: Comportamento do teste de aferição de Outubro a Dezembro (2022) – Instalação ALFA equipamento APVL.

Na Figura 44 e 45, instalação ALFA equipamento Thermo 028363, os dados obtidos no ano de 2022 com 272 aferições (leituras), evidenciam que os pontos se mantiveram entre o

limite superior (2,63 $\mu\text{Sv/h}$) e limite inferior (1,75 $\mu\text{Sv/h}$) de controle, ambos calculado a partir do valor da aferição inicial de 2,19 $\mu\text{Sv/h}$ como sendo o valor de referência dentro dos $\pm 20\%$ das leituras nos meses de Janeiro a Março antes da calibração. A figura 5 apresenta os dados que se mantiveram entre o limite superior (2,64 $\mu\text{Sv/h}$) e limite inferior (1,76 $\mu\text{Sv/h}$) calculado a partir do valor da aferição inicial de 2,20 $\mu\text{Sv/h}$ como sendo o valor de referência dentro dos $\pm 20\%$ nos meses de Junho a Dezembro de 2022 após a calibração.

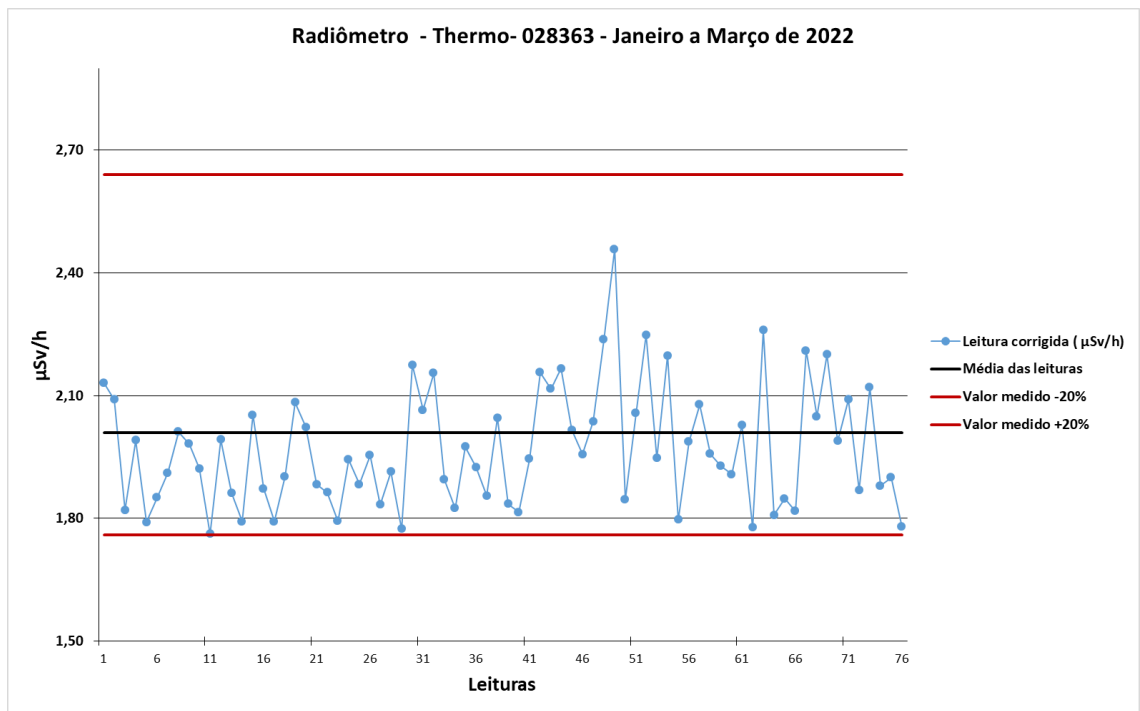


Figura 44: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Março – Instalação ALFA equipamento Thermo.

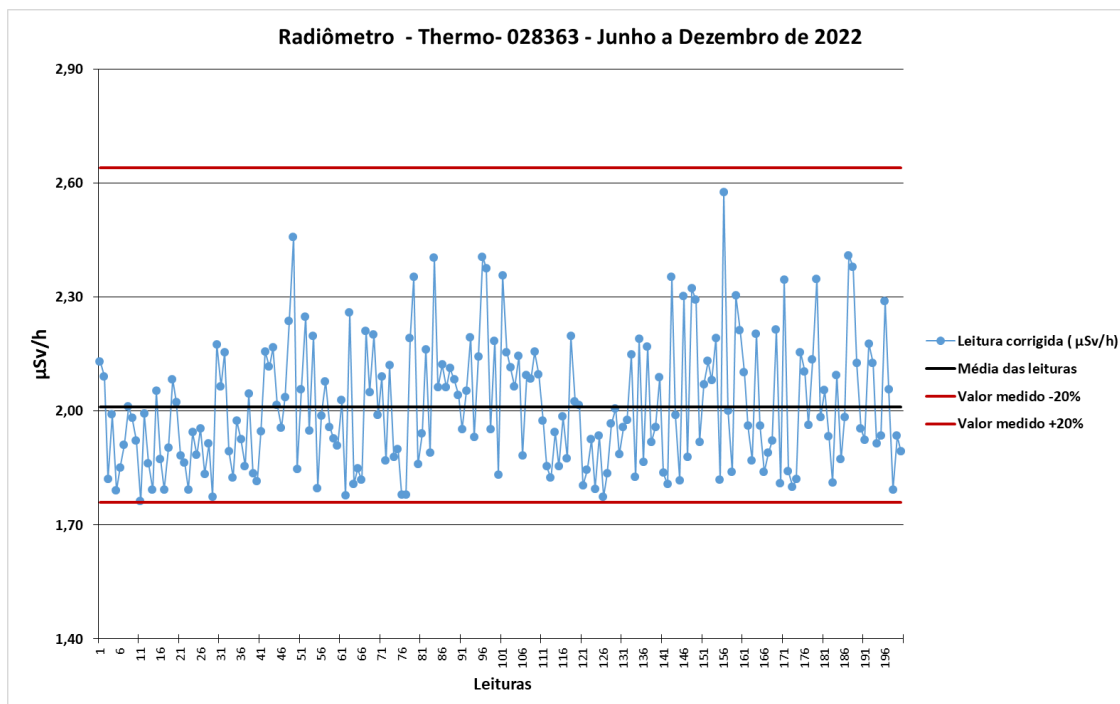


Figura 45: Comportamento do teste de aferição de Junho a Dezembro (2022) – Instalação ALFA equipamento Thermo.

A Figura 46 apresenta dos dados obtidos em 2022 pela instalação BETA equipamento APVL 025909, com 196 aferições. Estes dados evidenciam que os pontos se mantiveram entre o limite superior (2,47 $\mu\text{Sv/h}$) e limite inferior (1,64 $\mu\text{Sv/h}$) de controle. Estes limites são calculados a partir da aferição inicial (2,06 $\mu\text{Sv/h}$) como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras no ano de 2022.

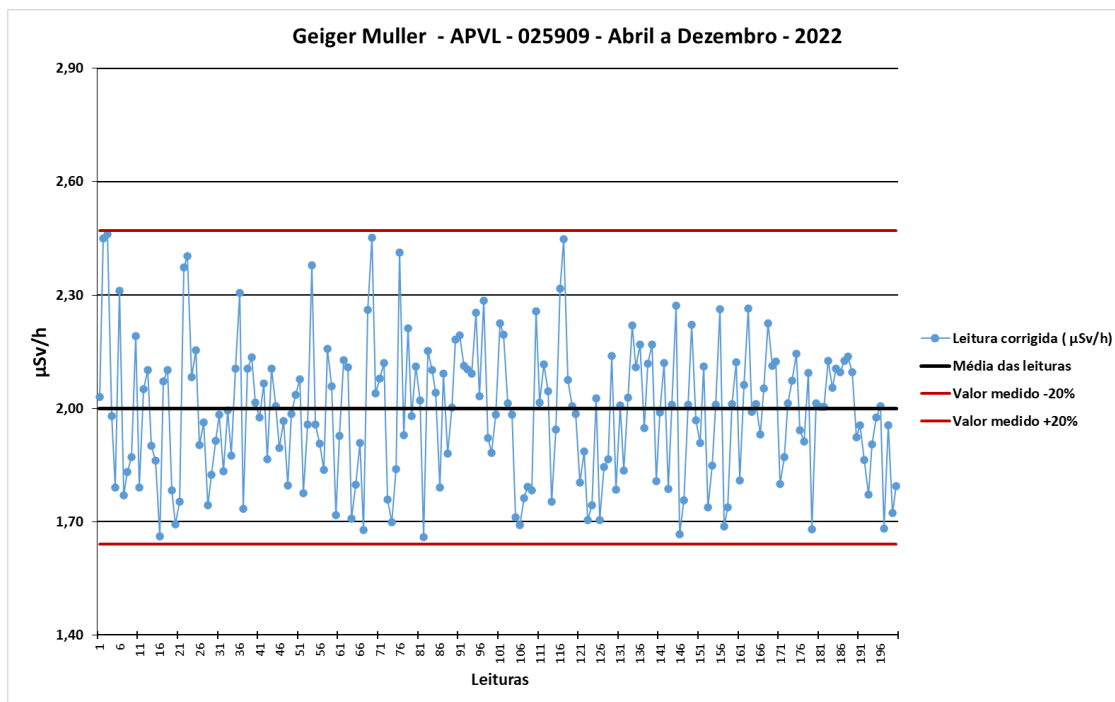


Figura 46: Comportamento do teste de aferição de Abril a Dezembro (2022) – Instalação BETA equipamento APVL.

Na Figura 47, os dados são referentes à instalação BETA equipamento APVL 028778 e foram obtidos no ano de 2022 com 111 aferições e evidenciam que os pontos se mantiveram entre o limite superior ($2,58 \mu\text{Sv/h}$) e limite inferior ($1,72 \mu\text{Sv/h}$) de controle. Estes limites são calculados a partir da leitura de aferição inicial ($2,15 \mu\text{Sv/h}$) como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras.

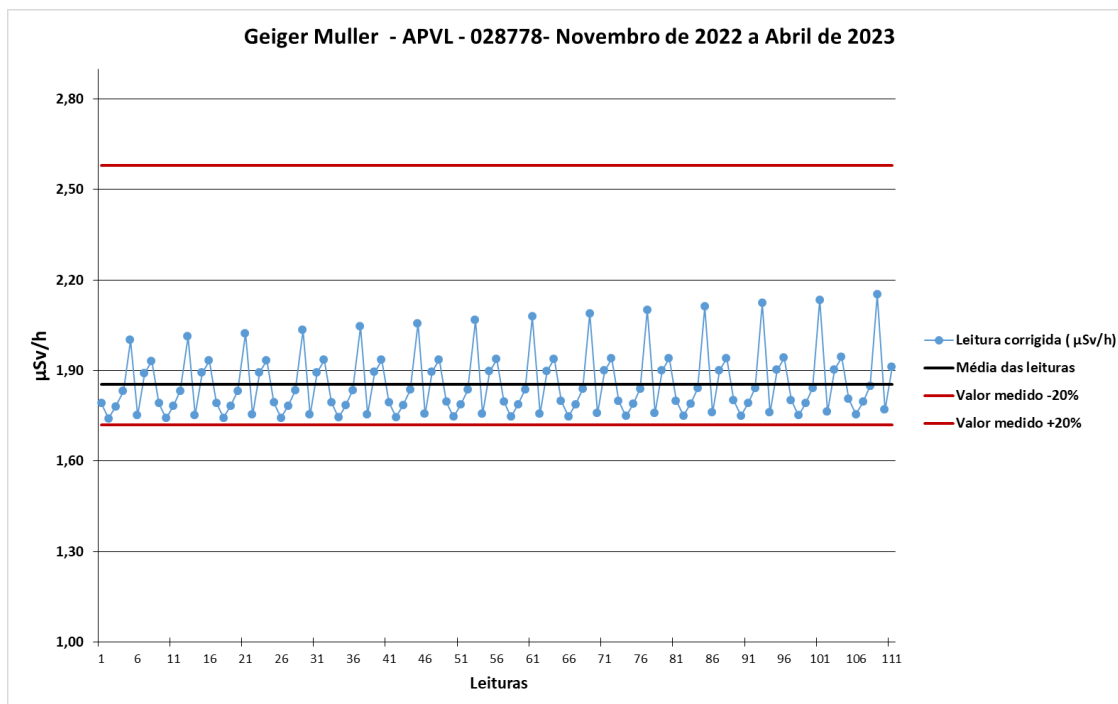


Figura 47: Comportamento do teste de aferição de Novembro (2022) a Abril (2023) – Instalação BETA equipamento APVL.

As Figuras 48 e 49 referem-se à instalação GAMA, equipamento câmara de ionização, Ludlum 25007032. Os dados foram obtidos no ano de 2022. A figura 8 apresenta 171 leituras de aferições e evidenciam que os pontos se mantiveram entre o limite superior (1,59 µSv/h) e limite inferior (1,06 µSv/h) de controle. Estes limites são calculados a partir da aferição inicial de 1,33 µSv/h como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras nos meses de Janeiro a Junho antes da calibração.

A Figura 49 apresentam 101 leituras de aferição e os pontos se mantiveram entre o limite superior (1,54 µSv/h) e limite inferior (1,02 µSv/h), limites calculados a partir da aferição inicial de 1,28 µSv/h como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras nos meses de Setembro a Dezembro depois da calibração.

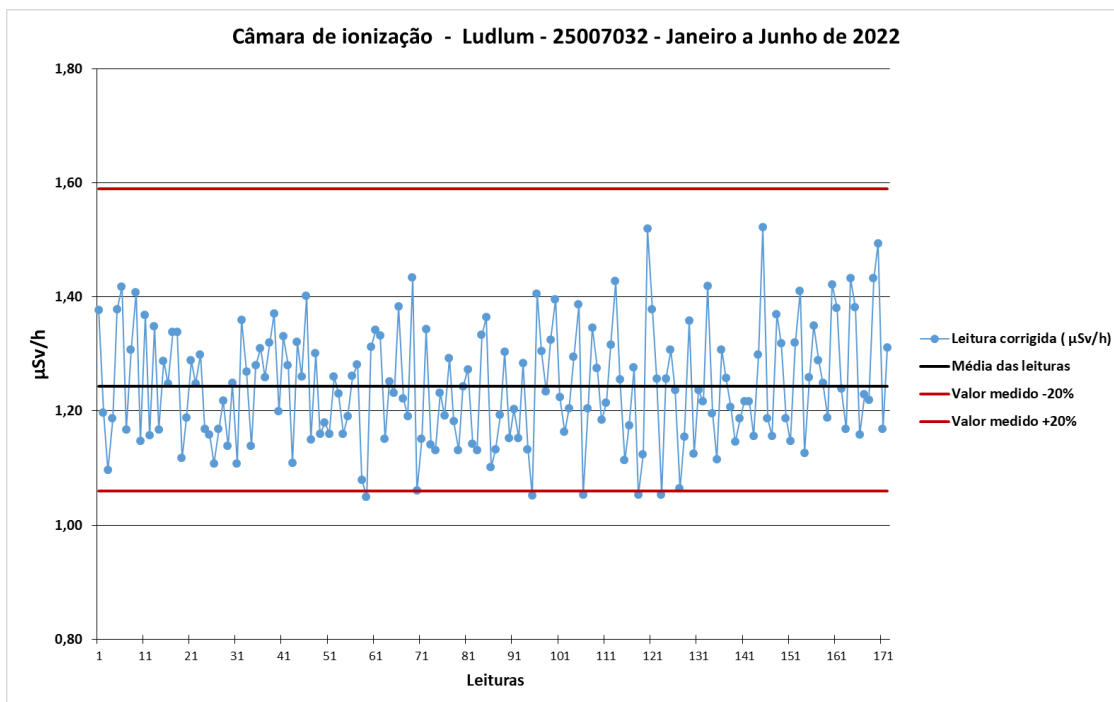


Figura 48: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Junho (2022) – Instalação GAMA equipamento Ludlum.

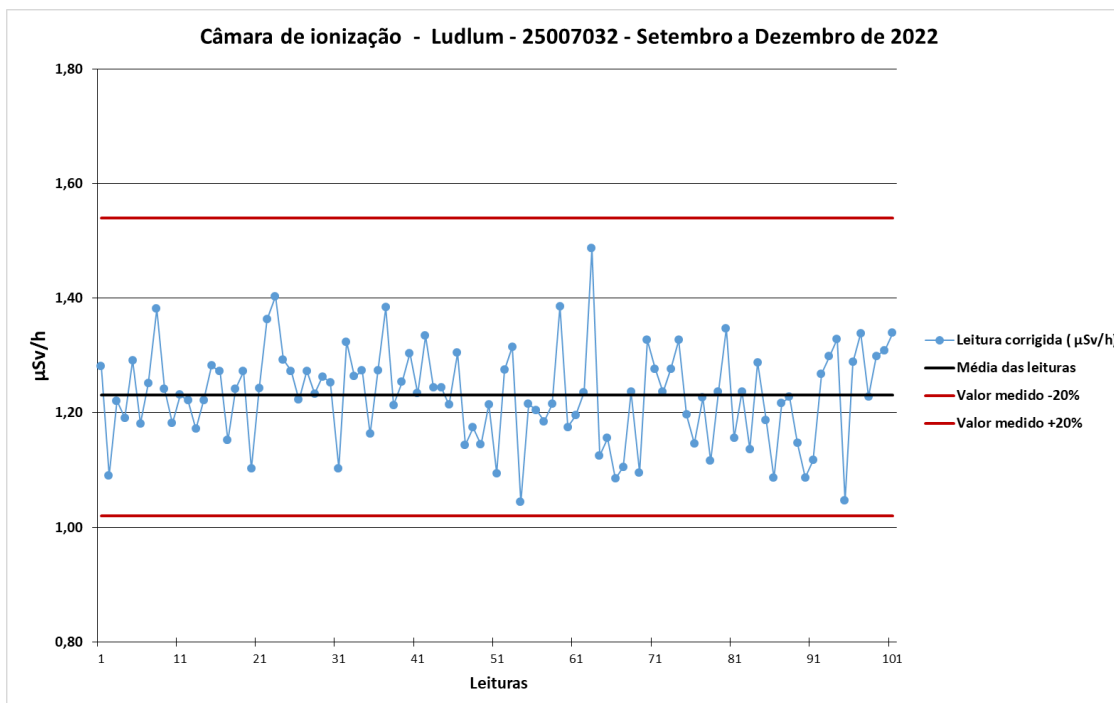


Figura 49: Comportamento do teste de aferição de Setembro a Dezembro (2022) – Instalação GAMA equipamento Ludlum.

Conforme a Figura 50, os dados referem-se à instalação GAMA, equipamento APVL 25905. Os dados foram obtidos nos meses de Fevereiro a Dezembro de 2022 após a calibração, com um total de 281 leituras de aferições e evidenciam que os pontos se mantiveram entre o limite superior (2,46 $\mu\text{Sv/h}$) e limite inferior (1,64 $\mu\text{Sv/h}$) de controle. Estes limites são calculados a partir da leitura de aferição inicial (2,05 $\mu\text{Sv/h}$) como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras.

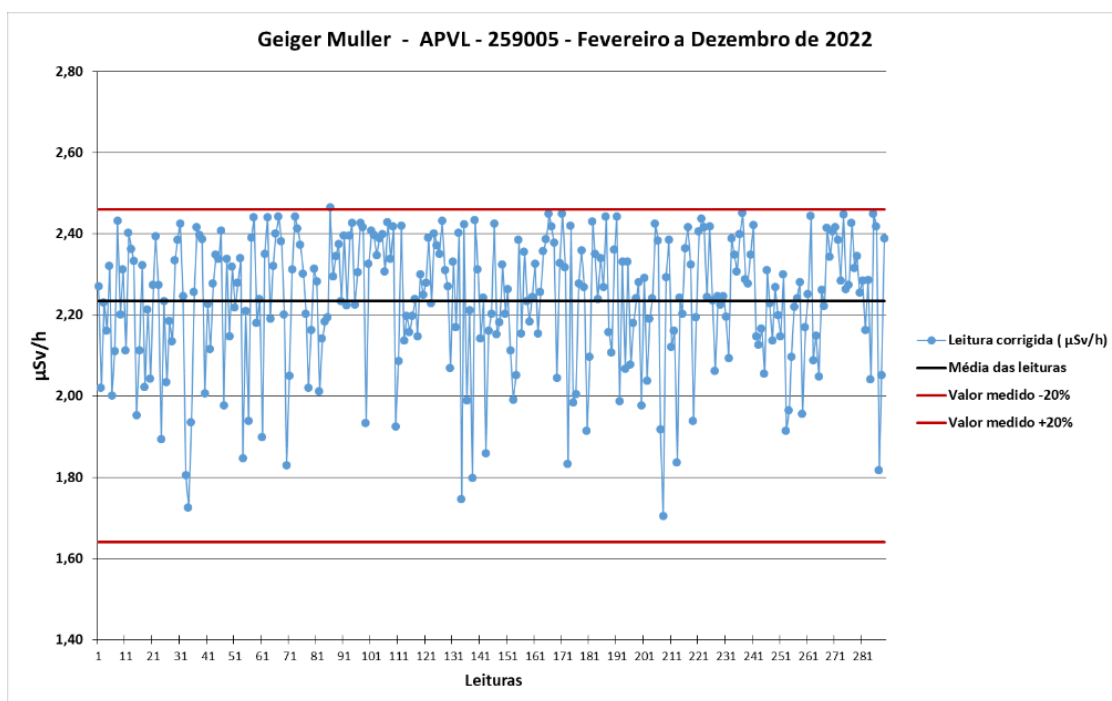


Figura 50: Comportamento do teste de aferição de Fevereiro a Dezembro (2022) – Instalação GAMA equipamento APVL

As Figuras 51 e 52 referem-se à instalação GAMA, equipamento Geiger Muller, APVL 67512. Os dados foram obtidos no ano de 2022. A Figura 50 apresenta 51 leituras de aferições antes da calibração nos meses de Janeiro a Fevereiro e evidenciam que os pontos se mantiveram entre o limite superior (2,97 $\mu\text{Sv/h}$) e limite inferior (1,98 $\mu\text{Sv/h}$) de controle. Estes limites são calculados a partir da aferição inicial de 2,48 $\mu\text{Sv/h}$ como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras nos meses de Janeiro e Fevereiro antes da calibração.

A Figura 51 apresentam 261 leituras de aferição e os pontos se mantiveram entre o limite superior (2,27 $\mu\text{Sv/h}$) e limite inferior (1,51 $\mu\text{Sv/h}$), limites calculados a partir da aferição inicial de 1,89 $\mu\text{Sv/h}$ como sendo o valor de referência para os $\pm 20\%$ das leituras nos meses de Abril a Dezembro após a calibração.

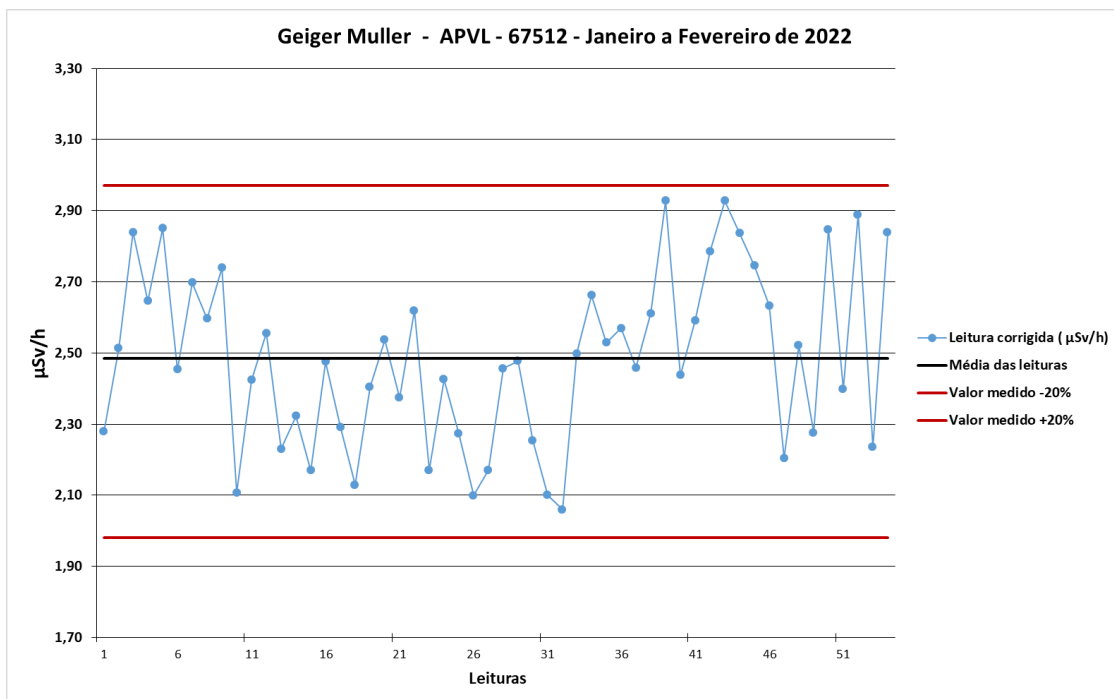


Figura 51: Comportamento do teste de aferição de Janeiro a Fevereiro (2022) – Instalação GAMA equipamento APVL

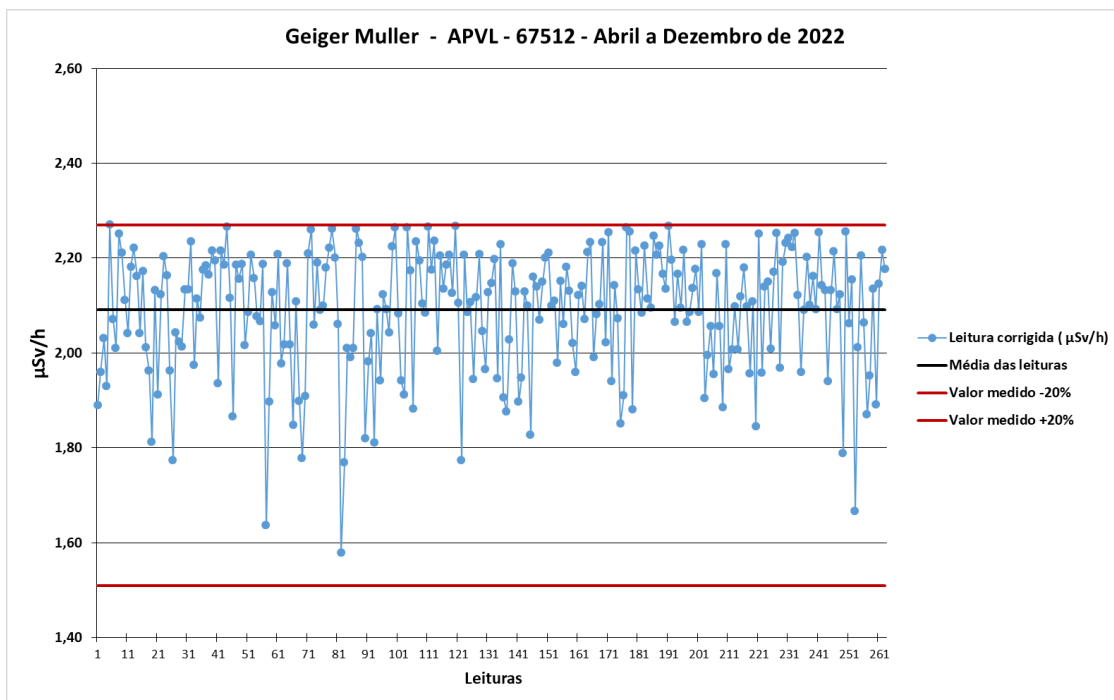


Figura 52: Comportamento do teste de aferição de Abril a Dezembro (2022) – Instalação GAMA equipamento APVL.

Conclusão

Pode-se observar na Tabela 25, que as instalações que possuem o risco de contaminação e irradiação, que atuam com fonte não seladas, cumprem com requisito de terem no mínimo dois medidores com período de calibração de dois anos. Nota-se que não há uma concordância no prazo do período de calibração, comparando com as instalações radiativas com risco somente de irradiação (escâner de inspeção de bagagens e contêineres). Não há definido ou registrado em normas, os critérios que determinam em quais períodos os medidores devem ser calibrados de forma padronizada para as instalações radiativas. Sabe-se que, instalações de inspeção de segurança utilizam sensores no fluxo de inspeção com relação a lógica de intertravamento do sistema de segurança. Estes sensores são intertravados com a emissão do feixe de Raios X, que sai do acelerador garantindo segurança ao processo. Diferente de instalações que tem chance de ocorrência para contaminação do IOE, público e meio ambiente, exemplo: medicina nuclear, produção de radioisótopo, radiofarmácia, distribuição de radiofármacos, perfilagem e radioterapia, em cada uma dessas áreas a periodicidade de calibração é bianual, diferente de uma instalação geradora de radiação ionizante, que nunca irá possibilitar a contaminação por material radioativo, nem a possibilidade de roubo de fonte.

A gestão de um sistema de medição é necessária, juntamente com o Plano de Proteção Radiológica. Com objetivo de gerenciar o risco de que o instrumento e os processos de medição possam produzir resultados corretos. Para este fim, alguns métodos estatísticos podem ser utilizados para avaliação dos resultados.

O comportamento e o desempenho dos medidores estão sumarizados nas figuras 41 a 52. Para os limites superior e inferior foi utilizada a incerteza de 20% do valor medido após a calibração. Os resultados dos testes de aferição apontam a ausência de falhas nos medidores antes e após a calibração, destacando a linearidade ao longo do tempo para valores na ordem de grandeza de micro (10^{-6}).

Os dados obtidos em medidores e instalações diferentes evidenciam uma distribuição dos dados dentro do intervalo de acurácia. Assim, uma abordagem estatística, tornou possível evidenciar que os pontos se mantiveram entre os limites superiores e limites inferiores de controle, ambos calculados a partir do valor da aferição inicial como sendo o valor de referência dentro dos $\pm 20\%$ das leituras. Todas as leituras foram corrigidas para a data da primeira aferição como referência.

Logo, para os exemplos abordados, os medidores mostram-se seguros para análise dosimétrica em serviço de proteção radiológica e úteis para análise da taxa da dose equivalente ambiente.

Assim, os testes estatísticos mostram que os equipamentos se mantiveram calibrados ao longo dos meses, por manterem um desempenho satisfatório, torna-se dispensável a retirada dos equipamentos para envio a calibração anual.

Conseqüentemente, a execução de: Logística, transporte, documentação, armazenamento do medidor e saída de objetos em instalações alfandegárias, fazem com que todo o processo leve aproximadamente dois meses entre a saída e retorno para instalação. Além disso, toda saída dos medidores aumenta a chance de danos e furto dos equipamentos altamente sensíveis. A proposta é que o prazo seja bianual para calibração.

ANEXO 2: ARTIGOS PUBLICADOS

PELEGRINELI.; et al. *Fast radiological safety evaluation Applied to maintenance in cargo and container inspection facilities*. Toxicology and Industrial Health. 2022, Vol. 0(0) 1–6.



Article

Toxicology and
Industrial Health

Fast radiological safety evaluation applied to maintenance in cargo and container inspection facilities

Toxicology and Industrial Health
2022, Vol. 0(0) 1–6
© The Author(s) 2022
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/07482337221080801
journals.sagepub.com/home/tih

Samuel Q Pelegrineli^{1,2} , Ademir X Silva¹, Wilson SS Filho³, Luciano SR Oliveira⁴, Aneuri S Amorim⁴, Domingos d'Oliveira Cardoso⁵, Ricardo M Stenders⁶, Wagner S Pereira¹, Juraci PR Junior² and Edson R Andrade⁵

Abstract

The application of nuclear technologies in a cargo and container inspection facility can increase the risk of accidents. Estimating the radiation dose in the controlled area generates critical information for elaborating routines aimed at establishing more effective safety procedures. For radiological protection purposes, mapping ambient dose equivalent $H^*(10)$ levels is crucial. The radiation source used was a fixed linear accelerator of 4.5 MeV. Five RadEye PRD-ER (Thermo Fisher Scientific) personal radiation monitors and five Geiger-Müller MRAD 111 (Ultra Radac) personal radiation monitors were used for the radiation measurements. The highest ambient equivalent dose rate and dose per scan were found with the Geiger-Müller monitors at values of 5.76E-01 mSv/h and 1.12E-03 mSv, respectively. The results showed that for public individuals, the number of scans at the point of highest dose rate value cannot exceed 893-unit operations. Additionally, the risks involved in the abnormal situation (increased $H^*(10)$) were estimated by using a model to predict the development of solid cancer as a result of occupational radiological exposure. This procedure highlights the risks involved, hence providing initial support to the decision process.

Keywords

Radiation, containers scanning, occupational risk, exposure, safety

Received 26 August 2021; Revised 4 December 2021; Accepted 26 January 2022

Introduction

There are equipment designed to scan large volumes of cargo using fixed linear accelerators (Linacs) as a radiation source (May, 2008; Gomes et al., 2021). Such equipment may require the construction of an area delimited by fixed-protective barriers (shielding). The cargo and container inspection system's safety regulation, and technical requirements, depend on the conceptual framework for radiological protection. Providing useful data to the decision-making process, including the protection of the general public circulating in the free areas of the installation, is a priority. The way in which a radiative inspection facility is conceived, organized, or arranged is a crucial point in the processes of licensing, control, evaluation, inspection, regulation, and standardization, regardless of

its purpose (Charles, 2008; Hupe and Ankerhold, 2007). Most of the cargo inspection systems have the purpose of identifying illegal practices. Such practices can

¹Graduate Program in Nuclear Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil

²Faculty Bezerra de Araújo (FABA), Rio de Janeiro, Brazil

³Instituto Federal do Piauí (IFPI), Teresina, Brazil

⁴Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN), Rio de Janeiro, Brazil

⁵Graduate Program in Nuclear Engineering, Military Institute of Engineering, Rio de Janeiro, Brazil


⁶Faculty of Economics, Graduate Program, FAAP, São Paulo, Brazil

Corresponding author:

Edson R Andrade, Graduate Program in Nuclear Engineering, Military Institute of Engineering, Rio de Janeiro 411031, Brazil. Email: fisica.dna@gmail.com

ARTICLE

Evaluation of the radiological risk in cargo scanning by comparison with known biological consequences

S.Q. Pelegrinelli^{1,2}, A.X. Silva¹, W.S.S. Filho³, L.S.R. Oliveira⁴, R.M. Stenders⁶, J.P.R. Junior², W.S. Pereira¹ and E. Ramos de Andrade^{5,*} 

¹ Nuclear Engineering Graduate Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil.

² Faculty Bezerra de Araújo (FABA), Rio de Janeiro, Brazil.

³ Federal Institute of Education, Science and Technology of Piauí (IFPI), Teresina, Brazil.

⁴ Institute for Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Defense (IDQBRN), Rio de Janeiro, Brazil.

⁵ Defense Engineering Graduate Program, Military Institute of Engineering (IME), Rio de Janeiro, Brazil.

⁶ Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP), School of Economics, São Paulo, Brazil.

Received: 19 August 2021 / Accepted: 24 December 2021

Abstract – This study proposes a quick, easy, and low-cost method that can be used to assess the radiological safety of an irradiation line used for cargo and container inspection facilities. The radiation-emitting equipment used was a Smiths Heimam particle accelerator model HCVP4029 operating at 4.5 MeV. The radiation dose measurements were performed using a personal radiation monitor Ultra Radac mod MRAD 111 (Geiger–Müller). The ambient equivalent dose $H^*(10)$ was estimated for two facilities: A (real) (1.12E-03 mSv per scan) and B (fictitious) (3.25E-03 mSv per scan). The dimensionless factor R, which represents a ratio between two specific scanning (Ss) quantities regarding the facilities A and B, is introduced as a reference for assessing the level of radiological safety. This study compares facilities A and B by using a simple alternative safety assessment based on the R factor. The dimensionless R-value appears to be able to facilitate both the personnel's and the general public's perception of risk levels, even with no fixed scale.

Keywords: scanner / cargo inspection / radiological protection

1 Introduction

Equipment designed to scan large volumes of cargo using fixed linear accelerators (Linacs) may pose a risk to the operators and its surroundings (Hupe and Ankerhold, 2007). Such equipment requires the construction of a structure with an area delimited by fixed protection barriers (NCRP, 2005). The regulations and technical requirements for the control and safety of the operators and the professionals involved in the cargo and container inspection system depend on a conceptual framework for radiological protection (Hupe and Ankerhold, 2007; Gomes *et al.*, 2021).

In this study a comparison between the expected scan dose records and the doses from other applications was performed. The dimensionless factor R, which represents a ratio between two specific scanning quantities, is introduced as a reference for evaluating the radiological safety levels of the facilities. Procedure A, which is a comparison of two facilities (A and B)

under a simple alternative safety assessment, seeks to offer an additional shell in the radiological protection process.

2 Methods


The experimental data acquisition was carried out on-site by simple and easily accessible instrumentation with the aim of spreading the culture of radiation protection (ICRP, 2007). Measurements were performed at a Brazilian cargo and container inspection facility using a Smiths Heimam particle accelerator model HCVP4029 with a maximum operating energy of 4.5 MeV (Silva *et al.*, 2021). During on-site measurement activities at the port of Rio de Janeiro, Brazil, a Geiger–Müller type dose integrator (model MRAD 111) from the manufacturer Ultra Radac was used. The main characteristic of MRAD 111 is the measurement range of the ambient equivalent dose rate ($H^*(10)$). Measurements from MRAD 111 falls into the range of $0.01 \mu\text{Sv/h} < H^*(10) < 2 \text{ Sv/h}$ for the ambient equivalent dose rate, and $0.001 \mu\text{Sv} < H^*(10) < 9.99 \text{ Sv}$ for the integrated ambient equivalent dose. The expected uncertainties for the measurements can be

*Corresponding author: fisica.dna@gmail.com



ARTICLE

Potential increased radiological risk in cargo scanning activity

S.Q. Pelegrinelli^{1,2}, A.X. Silva¹, A. Santos³, W.S.S. Filho^{1,4}, W.S. Pereira¹, R.M. Stenders⁵
and E.R. Andrade^{3,6,*} 

¹ Nuclear Engineering Graduate Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil.

² Faculty Bezerra de Araújo (FABA), Rio de Janeiro, Brazil.

³ Nuclear Engineering Graduate Program, Military Institute of Engineering (IME), Rio de Janeiro, Brazil.

⁴ Federal Institute of Education, Science and Technology of Piauí (IFPI), Teresina, Brazil.

⁵ Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP), School of Economics, São Paulo, Brazil.

⁶ Defense Engineering Graduate Program, Military Institute of Engineering (IME), Rio de Janeiro, Brazil.

Received: 5 May 2022 / Accepted: 23 October 2022

Abstract – The image-based cargo inspection systems are generally intended to identify illegal practices. However, imaging processes from the scanning of motorized containers have been used for increasing industrial safety. This is made possible by the application of high-energy particle linear accelerators (linac). Measurements of both the environmental equivalent dose rate ($\delta H^*(10)$), and the integrated environmental equivalent dose ($H^*(10)$) were performed. The estimation of $\delta H^*(10)$ and $H^*(10)$ in the scanning channel, including the driver's cab of the truck transporting the container, is critical. The aim of this study is to check the radiological safety for occasional users (drivers) by comparing the levels of $\delta H^*(10)$ and $H^*(10)$ with those adopted for public exposure. The study was experimentally conducted in a cargo and container inspection facility that uses a linac operating at the maximum energy of 4.5 MeV. During the *in situ* measurements, a SpiR-ID identifier detector Model F 8929 MGP manufactured by Mirion Technologies was used. The measurements in the driver's cab suggest that the procedure can be considered safe. However, a fast transient of $\delta H^*(10)$ was identified recording raised values (peaks) around $210 \times$ the threshold for public exposures in the first 9 s of each scanning procedure.

Keywords: cargo inspection / radiological protection / radiation risk

1 Introduction

As a result of the commercial expansion experienced in recent years the need to increase safety and guarantee the quality of industrial operations is gaining relevance. Although under strong regulation, radiological safety procedures performed in cargo inspection facilities need continuous evaluation. The safety of both products and logistical operations seems to work with an aspect of convergence. Products for distribution can be packed in containers which are sometimes subjected to non-invasive inspection processes like scanning. These inspections take place in specific facilities and use applications of imaging technologies such as linear particle accelerators (linacs). In its origin, image inspection systems applied for cargo in containers were intended to identify illegal practices. These practices address trafficking in weapons, explosives, drugs, smuggling of goods, and even human beings

(Emmanuel and Chinyere, 2017; Gomes *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2013; ICRP, 2007).

The equipment designed to perform cargo scanning at a fixed location may require an infrastructure delimited by fixed physical boundaries. The regulation and technical requirements for control and safety of both operations and personnel depend on a conceptual radiological protection framework (May, 2008). This structure also produces relevant information for monitoring and record keeping of quintessential data related to dose levels of radiation. From the perspective of radiation protection, this information is crucial not only for making decisions regarding safety, but also to identify future health detriments. Therefore, an assessment of the radiation dose levels in the operational environment is a preponderant factor for assessing risks and finding nonconformities (Fass, 2005; May, 2008; Pelegrinelli *et al.*, 2022b; Pelegrinelli *et al.*, 2022c).

The linac is designed to generate high-energy beams of X-rays. The working principle and applications of these machines can be found in detail in the work of Seeman *et al.* (2020).

*Corresponding author: andradepeg@ime.eb.br