



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Estudo das Vestimentas de Proteção Radiológica (VPRs) para manutenção de usinas nucleares móveis.

PEDRO ALEXANDRE PINTO CELESTINO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientador:
Prof. Dr. Gian Maria Agostino Angelo Sordi

São Paulo

2022

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Estudo das Vestimentas de Proteção Radiológica (VPRs) para
manutenção de usinas nucleares móveis**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

PEDRO ALEXANDRE PINTO CELESTINO

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientador:

Prof. Dr. Gian Maria Agostino Angelo Sordi

São Paulo

2022

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

Como citar:

CELESTINO, P. A. P. ***Estudo das Vestimentas de Proteção Radiológica (VPRs) para manutenção de usinas nucleares móveis***. 2022. 119 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Celestino, Pedro Alexandre Pinto

Estudo das Vestimentas de Proteção Radiológica (VPRs) para manutenção de usinas nucleares móveis / Pedro Alexandre Pinto Celestino; orientador Gian Maria Angelo Agostino Sordi. -- São Paulo, 2022.

119 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. Proteção Radiológica. 2. Vestimentas de Proteção Radiológica. 3. Atenuação da radiação ionizante. 4. Otimização. 5. Ergonomia. I. Sordi, Gian Maria Angelo Agostino, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Pedro Alexandre Pinto Celestino

Título: Estudo das Vestimentas de Proteção Radiológica (VPRs) para manutenção de usinas nucleares móveis.

Pedro Alexandre Pinto Celestino

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Data: ___/___/___

Banca examinadora

Prof.Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof.Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof.Dr.: _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Maria das Graças e Ribamar. A minha amada esposa Micaela Frasson Montero, por todo amor, companheirismo e incentivo e as minhas filhas Maria Teresa e Luzia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Gian Maria Agostino Angelo Sordi, pela paciência, ajuda e orientação na condução deste trabalho.

A Sra. Sylvia Sordi, por todo cuidado e apoio prestado para conclusão deste trabalho.

A Dra. Denise Levy por toda ajuda, disponibilidade, sugestões durante a construção e conclusão deste trabalho.

Ao IPEN, pelo conhecimento na área nuclear necessário para meu crescimento profissional e pela oportunidade para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores e amigos do IPEN, pela força, paciência e valiosas contribuições para a construção do conhecimento.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e Organizações Militares subordinadas pelas facilidades concedidas.

Aos meus chefes diretos, superiores hierárquicos e subordinados pela paciência, amizade e companheirismo que foram suporte fundamental para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

A minha esposa Micaela Frasson Montero, pelo constante incentivo, fidelidade, compreensão, e carinho essenciais para a continuidade deste trabalho.

Aos meus pais que desde cedo me incentivaram a valorizar as virtudes necessárias para sempre buscar o conhecimento.

A Deus, pelo dom da vida, sabedoria e inteligência.

Muito obrigado!

RESUMO

CELESTINO, P. A. P. **Estudo Das Vestimentas De Proteção Radiológica (Vprs) para manutenção de usinas nucleares móveis.** 2022. 119 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <http://repositório.ipen.br/> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

A maior parte da exposição à radiação dos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs) em uma usina nuclear vem da inspeção, manutenção e reparo dentro do compartimento do reator. O objetivo do estudo foi desvendar a vestimenta que, concomitantemente, apresenta o melhor resultado para atenuação de radiação ionizante, bem como, uma boa ergonomia para o profissional de manutenção de usinas nucleares móveis. Para isso foi realizada uma pesquisa de mercado e, como resultado, foram encontradas nove Vestimentas de Proteção Radiológica (VPRs), de cinco fabricantes diferentes e proveniente de três países, Estados Unidos, Japão e China; e que se apresentam factíveis de serem adquiridas. Para escolha da VPR foram utilizadas as técnicas de otimização da publicação 55 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR): análise de prioridades com atributos múltiplos e análise com critérios múltiplos excedentes. Com base nas informações disponibilizadas pelos fabricantes foram escolhidos cinco atributos para comparação: custo de proteção, percentual de atenuação de radiação ionizante, peso, conforto e descontaminação superficial da vestimenta. Para verificar a robustez da solução analítica encontrada, foram variados os valores das constantes de crescimento, onde observou-se que a solução analítica encontrada é fortemente influenciada quando se altera o custo de proteção, por ser a VPR de maior custo entre todas as pesquisadas. A VPR elegida por ambas as técnicas de otimização foi a STEMRAD 360^Y, que apresenta a maior capacidade de atenuação de radiação ionizante, bem como configura-se como VPR com maior ênfase ao quesito ergonomia. Por fim, a partir da vestimenta apontada como o melhor equipamento de proteção, foram propostos ensaios para averiguar a capacidade de atenuação da radiação ionizante, bem como os passos iniciais para desenvolvimento e confecção de uma Vestimenta de Proteção Radiológica Nacional (VPRN) para aplicação em manutenção de usinas nucleares móveis.

Palavras-chave: Radiação ionizante, proteção radiológica, otimização, usinas nucleares móveis, ergonomia.

ABSTRACT

CELESTINO, P. A. P. **Study of Radiation Shielding Protective Clothing's (RSPCs) for maintenance of mobile nuclear power plants.** 2022. 119 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <http://repositório.ipen.br/> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Most radiation exposure in Occupationally Exposed Individuals (OEl) at a nuclear power plant comes from inspection, maintenance and repair within the reactor compartment. The objective of this paper was to discover the garment that, at the same time, presents the best result of ionizing radiation attenuation, as well as good ergonomics for the maintenance professional of mobile nuclear plants. For this, market research was carried out and, as a result, nine personal Radiation Shielding Protective Clothing's (RSPCs) were found, from five different manufacturers and from three countries, the United States, Japan and China; and which are feasible to be acquired. To choose the RSPC, the optimization techniques of ICRP 55 were used: Multi-Attribute Utility Analysis and Multi-Criteria Outranking Analysis. Based on the information provided by the manufacturers, five attributes were chosen for comparison: protection cost, percentage of ionizing radiation attenuation, weight, comfort and surface decontamination of the protective garment. To verify the robustness of the analytical solution, the values of the scaling constants were re-calculated, where it was observed that the analytical solution found is strongly influenced when the protection cost is changed, as it is the highest cost RSPC among all those surveyed. The RSPC chosen by both optimization techniques was the STEMRAD 360^o, which has the highest ionizing radiation attenuation, as well as being the garment with greater emphasis on ergonomics. Finally, from the garment identified as the best protective equipment, tests were proposed to verify the attenuation capacity of ionizing radiation, as well as the initial steps for the development and manufacture of a National Radiation Shielding Protective Clothing (NRSPC) for application in maintenance of mobile nuclear power plants.

Keywords: Ionizing radiation, radiological protection, optimization, mobile nuclear power plant, ergonomics.

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 – Esquema de uma Planta Nuclear Móvel empregada na propulsão naval. Disponível em: http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000005/000005af.pdf	7
Figura 2 – Detalhe dos equipamentos e da tubulação dentro do Compartimento do Reator do submarino nuclear classe Virginia (SSN 774) [10].	9
Figura 3 – (a) Visualização do compartimento do reator do submarino nuclear Virginia SSN 774; (b) Representação da Seção 4 (Compartimento do Reator); Seção 5 (Sala de Controle da Propulsão) e da Seção 6 (Compartimento das Turbinas) do submarino classe Virginia [10].	10
Figura 4 – Representação do mecanismo de ativação dos materiais no compartimento do reator.	12
Figura 5 – VPR modelo B12 para trabalho com raios X e raios gama de energia pequena [1].	27
Figura 6 – Transmissão de dose de radiação do ^{241}Am em diferentes materiais [27].	36
Figura 7 – Transmissão de radiação gama do ^{109}Cd em diferentes materiais [27].	36
Figura 8 – Transmissão de radiação gama pelo ^{137}Cs no material especial e no Tântalo (Ta) [27].	36
Figura 9 – Transmissão de radiação gama do ^{60}Co no material especial, Tântalo (Ta) e Cobre (Cu) [27].	36
Figura 10 – Modelo DEMRON™ W CBRN Ensemble.	38
Figura 11 – Modelo DEMRON™ FULL BODY SUIT.	40
Figura 12 – Modelo DEMRON™ RADIATION TORSO VEST.	41
Figura 13 – Modelo HKX 1558 Full Body Suit.	42
Figura 14 – Modelo Df vest 2mm.	43
Figura 15 – Composição das camadas do material BIORUBBER RSM.	45
Figura 16 – Taxa de blindagem do BIORUBBER RSM em raios gama de ^{137}Cs : teste-2. ANEXO B.	46
Figura 17 – Modelo BIORUBBER Tipo XI – E400 4mm.	48
Figura 18 – Detalhe do projeto do dispositivo de blindagem STEMRAD 360 ^γ . a. O componente de atenuação de radiação do dispositivo de blindagem é composto por várias folhas de chumbo virgem de 1 mm de formato exclusivo com divisórias de minimização de atrito colocadas entre elas e vários outros elementos estruturais para manter a flexibilidade e durabilidade. b. A topografia do componente de atenuação corresponde à anatomia do BM subjacente, de modo que é de uma espessura inversamente relacionada à espessura e à densidade do tecido presente entre o dispositivo e a medula óssea, minimizando assim o peso sem comprometer a proteção [31].	50
Figura 19 – Chumbo equivalente e atenuação da radiação no dispositivo de blindagem StemRad [32].	51
Figura 20 – Modelo STEMRAD 360 ^γ [31].	52
Figura 21 – Função prioridade parcial do custo de proteção das VPRs – u(X).	61
Figura 22 – Função prioridade parcial do % de atenuação para o ^{137}Cs – u(A).	61
Figura 23 – Função prioridade parcial do peso da VPR – u(P).	62
Figura 24 – Função prioridade parcial para o conforto da VPR – u(C).	63
Figura 25 – Função prioridade parcial para a descontaminação superficial da VPR – u(D).	64
Figura 26 – Esquema da bancada de teste para medição da radiação nas VPRs [34].	79
Figura 27 – Arranjo da bancada de medição com a vestimenta DEMRON da RST [35].	79
Figura 28 – Arranjo da bancada de medição com foco no detector FALCON 5000.	80

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Limites de dose Anuais para IOE e para o público no Brasil CNEN NN 3.01[4].	24
Tabela 2 – Evolução dos fatores de ponderação dos tecidos, W_T .	25
Tabela 3 – DEMRON™ W CBRN ENSEMBLE.	39
Tabela 4 – Principais características da folha Df tipo W.	42
Tabela 5 – Resultado da taxa de blindagem BIORUBBER RSM - teste 1 (ANEXO B).	45
Tabela 6 – Quadro dos percentuais de atenuação para cada tipo de radiação em diferentes materiais BIORRUBBER RSM (disponível no sítio do fabricante)[30].	46
Tabela 7 – Quadro comparativo dos principais parâmetros das vestimentas de corpo inteiro.	54
Tabela 8 – Quadro comparativo dos principais parâmetros das vestimentas de proteção local.	55
Tabela 9 – Quadro comparativo dos principais atributos das opções proteção (VPR).	58
Tabela 10 – Atributos e as respectivas constantes de crescimento e funções de prioridade parcial.	59
Tabela 11 – Análise de prioridade parciais para as opções consideradas.	64
Tabela 12 – Constantes de crescimento em ordem decrescente de importância: (a) com relação ao custo de proteção; (b) com relação a atenuação de radiação para o Césio-137 (atributo de maior importância).	65
Tabela 13 – Constantes de crescimento calculadas após normalização, em ordem decrescente de importância.	66
Tabela 14 – Análise de prioridade parciais com crescimento e prioridades totais para as opções consideradas.	67
Tabela 15 – Indicadores de vantagem para as opções consideradas, comparadas uma com as demais opções.	70
Tabela 16 – Critérios de exclusão para as opções consideradas, comparadas uma com as demais para o conforto da vestimenta.	71
Tabela 17 – Tabela final de comparação após aplicação dos critérios de exclusão para as opções consideradas, comparadas uma com as demais para o conforto da vestimenta.	71
Tabela 18 – Prioridade parciais com crescimento e totais para as novas constantes de crescimento.	74
Tabela 19 – Prioridades parciais com crescimento e totais para as novas constantes de crescimento.	76

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos gerais de proteção radiológica em plantas nucleares	1
1.2 Problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo geral	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Justificativa	5
2. FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Planta nuclear móvel.....	6
2.2 Mecanismos de ativação dos materiais	11
2.3 Efeitos biológicos da radiação	14
2.4 Princípios de proteção radiológica.....	15
2.4.1 Princípio da Justificação.....	15
2.4.2 Princípio da Otimização	15
2.4.2.1 Análise de prioridades com atributos múltiplos	19
2.4.2.2 Análise de critérios múltiplos excedentes	21
2.4.3 Princípio da limitação de dose	23
2.5 Revisão das vestimentas de proteção radiológica (VPRs)	26
2.5.1 Histórico de seleção das VPRs.....	26
2.5.2 Estado da Arte: Materiais usados na confecção das VPRs	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Pesquisa das VPRs existentes	32
3.1.1 VPRs selecionadas para o estudo.....	34
3.1.1.1 Radiation Shield Technologies (RST).....	34
3.1.1.2 Guangzhou Hekang Biotechnology Company	41
3.1.1.3 Alpha Technical Research Company	42

3.1.1.4	Yamamoto Corporation.....	44
3.1.1.5	Stemrad	48
3.2	Estudo comparativo das VPRS existentes	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1.1	Análise de prioridades com atributos múltiplos para seleção das VPRs	59
4.1.2	Análise de critérios múltiplos excedentes para seleção das VPRs	68
4.1.3	Análise de sensibilidade das constantes de crescimento.....	72
5.	PROTÓTIPO DE VPRN	77
6.	CONCLUSÃO	80
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
	APÊNDICE A: ANÁLISE DE CRITÉRIOS MÚLTIPLOS EXCEDENTES: DETALHES PARA O CÁLCULO	88
	ANEXO A (RADIATION SHIELD TECHNOLOGIES)	92
	ANEXO B (YAMAMOTO CORPORATION).....	98
	ANEXO C (STEMRAD)	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM PLANTAS NUCLEARES

De acordo com a publicação Safety Series N° 22 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), o objetivo básico do uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) radiológico é evitar a contaminação da pele, a inalação e a ingestão de isótopos radioativos ou outros materiais tóxicos. Em alguns casos, o equipamento de proteção também pode ser usado para reduzir a exposição de partes do corpo à radiação gama (γ), raios-X ou beta (β) [1]. Em situações ocupacionais normais e de manutenção de uma usina nuclear de potência devem ser utilizados EPIs radiológicos, dentre eles, a Vestimenta de Proteção Radiológica (VPR), a fim de proporcionar um grau de proteção adequado aos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE).

É de conhecimento que, na prática, em compartimentos ao redor de reatores nucleares existe uma atmosfera de gases nobres que geralmente contêm radioiodos ou outros produtos de fissão que não podem ser detectados de forma rápida e fácil (Safety Series N° 22, 1967) [1]. Portanto, é de suma importância, que os profissionais de manutenção, durante uma inspeção ou uma manutenção geral das instalações, utilizem equipamentos que previnam possíveis contaminações de pele, dos olhos e por inalação.

A proteção radiológica pode ser definida como a ciência que tem por objetivo oferecer a proteção aos indivíduos e ao meio ambiente contra os efeitos nocivos à saúde provocados pela radiação ionizante. Tempo, distância e blindagem representam os fundamentos da proteção radiológica para diminuir a dose de radiação. O aumento do tempo de trabalho aumenta linearmente a dose de radiação recebida pelo indivíduo e a intensidade da radiação é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Além dos fundamentos, existem os princípios básicos de proteção: justificação, otimização e limitação de dose, introduzidos pela publicação 22 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR) [2], em inglês, *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, e que ofereceram instrumentos práticos para aplicação na proteção radiológica.

Com relação à blindagem, estudos recentes realizados por TUFAL et al. [3], apresentaram uma VPR com design leve e flexível, um desempenho de blindagem aprimorado

e um design ergonômico para melhorar o ajuste postural específico dos trabalhadores. Dessa forma, com a utilização de uma VPR com essas características, visa-se restringir, ainda mais, tanto a dose efetiva quanto a dose equivalente de radiação, de modo que não excedam os limites anuais estabelecidos para os trabalhadores e para o público de acordo com a norma CNEN NN 3.01[4].

No caso de uma Planta Nuclear Móvel (PNM) para propulsão de um meio naval, as VPRs além de cumprirem sua função fundamental, que é a de evitar a contaminação, devem atender requisitos de proteção radiológica e de ergonomia dos usuários dentro de um espaço limitado. Dentro da rotina diária de um marinheiro, existem algumas tarefas que exigem correr, agachar, subir e descer escadas, além de curvar-se para acessar certos equipamentos. Com o intuito de melhorar a proteção radiológica dos operadores de uma planta nuclear móvel embarcada em um navio, é necessário a utilização de uniformes que proporcionem alguma proteção radiológica, que permitam uma rápida descontaminação e que admitam a execução das tarefas conexas com as atividades de um homem do mar.

Além da rotina diária, existem rotinas de manutenções programadas dos equipamentos da Planta Nuclear Móvel (PNM) do navio. De acordo com o relatório do Programa de Propulsão Nuclear Naval do Departamento da Marinha dos Estados Unidos, a maior parte da exposição de radiação ao pessoal vem da inspeção, manutenção e reparo dentro do compartimento do reator [5]. Portanto, para essas manutenções dentro do compartimento do reator, os operadores deverão ser treinados, exaustivamente, a fim de reduzir o tempo de exposição; deverão respeitar as distâncias para as inspeções e manutenções em cada equipamento dentro do compartimento do reator; e deverão utilizar uma VPR que proporcione um grau de proteção adequado e que conflua para uma boa execução das tarefas.

Como parte contribuinte deste trabalho, será realizado um levantamento das soluções já existentes, analisando qual seria a melhor VPR que atende as exigências ergonômicas e de proteção radiológica para manutenção de uma PNM empregada para propulsão naval. Também tentaremos comparar, sempre que possível, aquelas vestimentas utilizadas em outros países que já empregam PNM na propulsão naval. Além disso, será realizado um estudo a fim de propor uma combinação de materiais para o desenvolvimento de uma

Vestimenta de Proteção Radiológica Nacional (VPRN), que permita a execução das atividades de manutenção, que seja de fácil descontaminação e que atenua a dose no trabalhador ocupacionalmente exposto.

1.2 PROBLEMA

Em virtude da necessidade dos marinheiros viverem nos navios durante a operação, os compartimentos do reator são projetados para atenuar a radiação fora do compartimento do reator para valores extremamente pequenos. Contudo, de acordo com Relatório do Programa de Propulsão Nuclear do Departamento da Marinha dos Estados Unidos a maior parte da exposição de radiação ao pessoal é causada pela inspeção, manutenção e reparo dentro do compartimento do reator [5].

Um outro fator importante com relação ao uso de vestimentas adequadas é que são equipamentos essenciais para realização de inspeções e manutenções em caso de incidentes e acidentes. Isto significa conhecer profundamente os diferentes tipos de situações anormais, de incidentes e de acidentes para se conhecer os possíveis agentes contaminantes. Tendo em vista que diferentes agentes contaminantes exigem diferentes técnicas e materiais de descontaminação.

Como afirma KALOSHKIN et al. [6], a crescente demanda pelo uso de materiais radioativos, bem como a produção de rejeitos radioativos, leva a itens que exigem uma maior segurança à radiação. Devem ser desenvolvidos e implementados novos métodos de proteção contra o prejuízo provocado pela radiação ionizante. Uma das abordagens é o desenvolvimento de novos materiais compósitos de proteção à radiação que não contenham chumbo tóxico e que não exijam um procedimento especial de descarte.

Segundo a preocupação apontada por PEREIRA & VERGARA [7], foram apresentados problemas ergonômicos das Vestimentas de Proteção Radiológicas, como tamanhos não adequados ao público-alvo (problemas antropométricos); desconforto com o peso e a temperatura do material das vestimentas; falhas na integridade (exposição desnecessária); não cumprimento da legislação quanto a disponibilidade e uso da vestimenta (ergonomia de conscientização) entre outros problemas.

Outro aspecto importante que precisa ser melhorado nas VPRs é a usabilidade do equipamento. Tendo em vista que quanto menor o tempo de exposição menor será a dose submetida ao trabalhador, é imprescindível que a vestimenta seja flexível, leve e confortável para permitir que a tarefa no compartimento do reator seja realizada no menor tempo possível contribuindo para a eficácia do trabalho.

O problema para utilização de vestimentas de proteção não está presente somente na área de manutenção nuclear, pois a entrevista realizada por GÜNDOĞDU & OVACILLI [8] revelou que profissionais do setor de medicina nuclear em um hospital na Turquia, têm dificuldade de usar aventais de uso prolongado e por isso afirmaram não os utilizar em alguns casos. O peso dos aventais de chumbo é relatado como principal motivo para isso.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Apontar a melhor Vestimenta de Proteção Radiológica (VPR), existente no mercado mundial, para manutenção de usinas nucleares móveis com foco nos quesitos de atenuação de radiação ionizante e conforto da vestimenta. Ainda como objetivo principal, será apontado um estudo inicial para o desenvolvimento de uma vestimenta de Proteção Radiológica Nacional (VPRN).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os materiais recentes usados na confecção de vestimentas de proteção radiológica;
- Pesquisar sobre as vestimentas de proteção radiológica que poderiam ser utilizadas pelas equipes de manutenção de uma PNM empregada na propulsão naval;
- Realizar um estudo comparativo entre as vestimentas de proteção radiológica utilizadas em aplicações semelhantes por outros países que possuem navios com propulsão nuclear;
- Elaborar a especificação de uma Vestimenta de Proteção Radiológica para aplicação em usinas nucleares móveis.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com o presente aumento do número de reatores de pesquisa e de potência em desenvolvimento em nosso país, como por exemplo, o Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE) e o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) ambos projetos localizados no município de Iperó-SP; a construção da terceira usina da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, também chamada de Angra 3, localizada no município de Angra dos Reis-RJ; e do desenvolvimento do projeto do Submarino com Propulsão Nuclear Brasileiro (SN-BR), portanto, é de interesse não só desses programas, mas de todos os setores que trabalham com radiação ionizante a nível nacional o desenvolvimento e pesquisas para aprimorar a proteção radiológica das VPRs que serão utilizadas por operadores e pelas equipes de manutenção de instalações nucleares.

No estudo conduzido por SOARES et al. [9], foi realizada uma análise da eficácia do uso de Vestimentas de Proteção Radiológicas por pacientes e Indivíduos Ocupacionalmente Expostos, no qual é observado que a crescente demanda pelo uso da radiação implica, conseqüentemente, um aumento de equipamentos de proteção radiológica. Todos os resultados mostram que a utilização da VPR está relacionada diretamente com a redução da dose, tanto no indivíduo ocupacionalmente exposto quanto no paciente. Seu uso se demonstra eficaz e faz valer o princípio ALARA, ou seja, a radiação é usada empregando doses otimizadas ao paciente e ao profissional da área.

Ainda não se dispõem de publicações (catálogos) que englobem todas as VPRs dos diferentes fabricantes existentes. Ainda nessas publicações, poderiam ser realizados estudos desses equipamentos comparando-os por meio de ensaios normatizados, a fim de gerar uma escala de proteção a radiação ionizante com um determinado grau de proteção para cada equipamento.

Também não há um mecanismo (por exemplo, um acordo) internacional que garanta, aos signatários, licenças de exportação dos produtos e equipamentos relacionados a proteção radiológica dos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos às radiações ionizantes. Assim, poderiam ser adquiridos, mais facilmente, pelo país interessado, quaisquer produtos e equipamentos de proteção radiológica.

Além disso, há uma lacuna na literatura com proposições de métodos comparativos e de especificação de vestimentas de proteção radiológicas que normatize os ensaios de proteção radiológica para as VPRs. Um trabalho deste tipo facilitaria e agilizaria a verificação e a seleção adequada de VPR para utilização pelos trabalhadores expostos a radiação ionizante de acordo com as especificações definidas para cada tipo de ambiente de trabalho.

2. FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos e as principais teorias para a compreensão plena deste estudo.

2.1 PLANTA NUCLEAR MÓVEL

Um navio movido a energia nuclear é construído com uma usina nuclear dentro de uma seção chamada de compartimento do reator. A Planta Nuclear Móvel (PNM) de um navio ou submarino utiliza um reator nuclear para gerar calor. O calor provém da fissão do combustível nuclear contido no reator. Como o processo de fissionamento também produz radiação, são colocadas blindagens ao redor do reator para que a tripulação fique protegida. Na Figura 1 temos um exemplo de um sistema de propulsão nuclear naval empregado em navios e submarinos.

Os componentes da usina nuclear incluem um reator de aço de alta resistência, trocadores de calor (gerador de vapor), pressurizador, tubulações, bombas e válvulas associadas. A blindagem de uma instalação nuclear contém mais de 100 toneladas de chumbo, parte da qual se torna radioativa pelo contato com material radioativo ou pela ativação por nêutrons das impurezas no chumbo.

As usinas de propulsão nuclear dos navios da Marinha dos Estados Unidos, embora difiram em tamanho e arranjos de componentes, são todos com reatores de Água Pressurizada (em inglês, *Pressurized Water Reactors, PWR*), sendo robustos, compactos, projetados, construídos e operados de acordo com critérios exigentes. Neste tipo de reator, a água circula através de um sistema primário para transferir calor do núcleo do reator para um sistema de vapor secundário isolado da água de resfriamento do reator.

O sistema primário consiste no reator, nas tubulações, nas bombas e nos geradores de vapor. O calor produzido no reator é transferido para a água pressurizada que passa pelos geradores de vapor e retorna ao reator para reaquecimento. Nos geradores de vapor, o calor da água no sistema primário é transferido para o sistema secundário para gerar vapor. O sistema secundário é isolado do sistema primário para que a água nos dois sistemas não se misture.

No sistema secundário, o vapor criado nos geradores de vapor flui para as turbinas e acionam os turbogeradores que produzem eletricidade, e para as turbinas de propulsão, que acionam a hélice. Depois de passar pelas turbinas, o vapor passa pelos condensadores voltando ao estado líquido e retornando aos geradores de vapor pelas bombas de alimentação. Assim, os sistemas primário e secundário são recirculados e renovados.

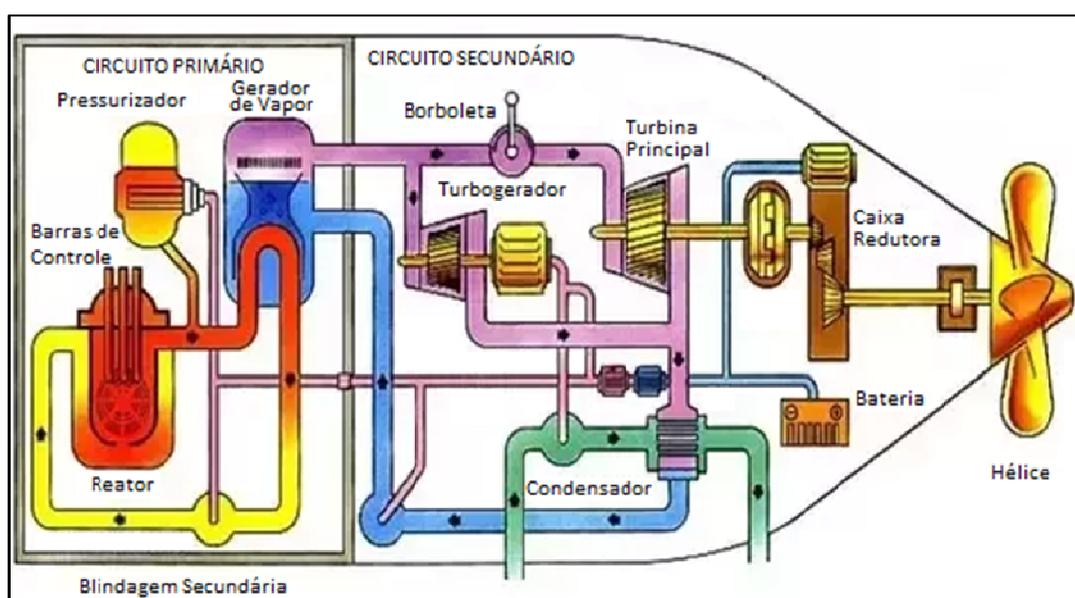


Figura 1 – Esquema de uma Planta Nuclear Móvel empregada na propulsão naval. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000005/000005af.pdf>.

Os reatores navais devem ser robustos e resilientes o suficiente para suportar décadas de operações rigorosas no mar, sujeitos a lançamentos, significantes oscilações de maré causando constantes choques com as defensas no cais, impactos e colisões durante as manobras de atracação e docagem, além de repetidas mudanças na demanda de potência do reator, para atender, possivelmente, condições de batalha. Essas condições, combinadas com o ambiente hostil dentro do compartimento do reator, que sujeita componentes e materiais aos efeitos a longo prazo de irradiação, corrosão, alta temperatura e pressão, requerem um

esforço ativo de tecnologia, completo e perspicaz para manter a operação do reator e aprimorar a confiabilidade das plantas nucleares moveis, além de garantir que a tecnologia de propulsão nuclear naval ofereça as melhores opções para necessidades futuras.

Os reatores de pesquisa e potência em operação no Brasil trabalham com pequeno percentual de enriquecimento de urânio, sendo enriquecido de até 5% em peso do isótopo físsil, Urânio-235. Diferentemente dos reatores utilizados em submarinos americanos, que possuem altos percentuais de enriquecimento do urânio, e são projetados para durar toda a vida útil da embarcação, os reatores nucleares com pequeno enriquecimento de urânio precisam ser reabastecidos aproximadamente a cada 5 anos. Sendo o período de manutenção uma das grandes preocupações do departamento de proteção radiológica pois são responsáveis pelo controle da dose nos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs) das instalações nucleares.

O combustível em um reator contém pastilhas de urânio enriquecido seladas por um revestimento metálico, chamado de vareta combustível. Para a construção de um elemento combustível são arranjadas inúmeras dessas varetas combustíveis. O urânio é um dos poucos materiais capazes de produzir calor em uma reação em cadeia auto-sustentável. Quando um nêutron causa a fissão de um átomo de urânio, o núcleo de urânio é dividido em partes que produzem átomos de produtos de fissão com menor número atômico. A radioatividade é criada durante a fissão porque alguns desses produtos de fissão são muito radioativos quando são formados.

Para submarinos, o compartimento do reator é um cilindro horizontal formado por uma seção do casco de pressão do navio, com anteparas blindadas em cada extremidade. Na Figura 2 tem-se uma ideia do compartimento do reator do submarino USS VIRGINIA (SSN 774) produzida e disponibilizada por estudantes da *New River Community College*, Dublin, Virginia, USA. Podem ser observados no centro o vaso do reator nuclear, os geradores de vapor ao entorno, e detalhes das tubulações do primário e do secundário da planta nuclear embarcada empregada na propulsão naval. Os equipamentos e as tubulações citadas são fonte de radiação após ativação por interação com os nêutrons e por deposição nas tubulações de radionuclídeos do núcleo transportados pelo fluido refrigerante do primário.

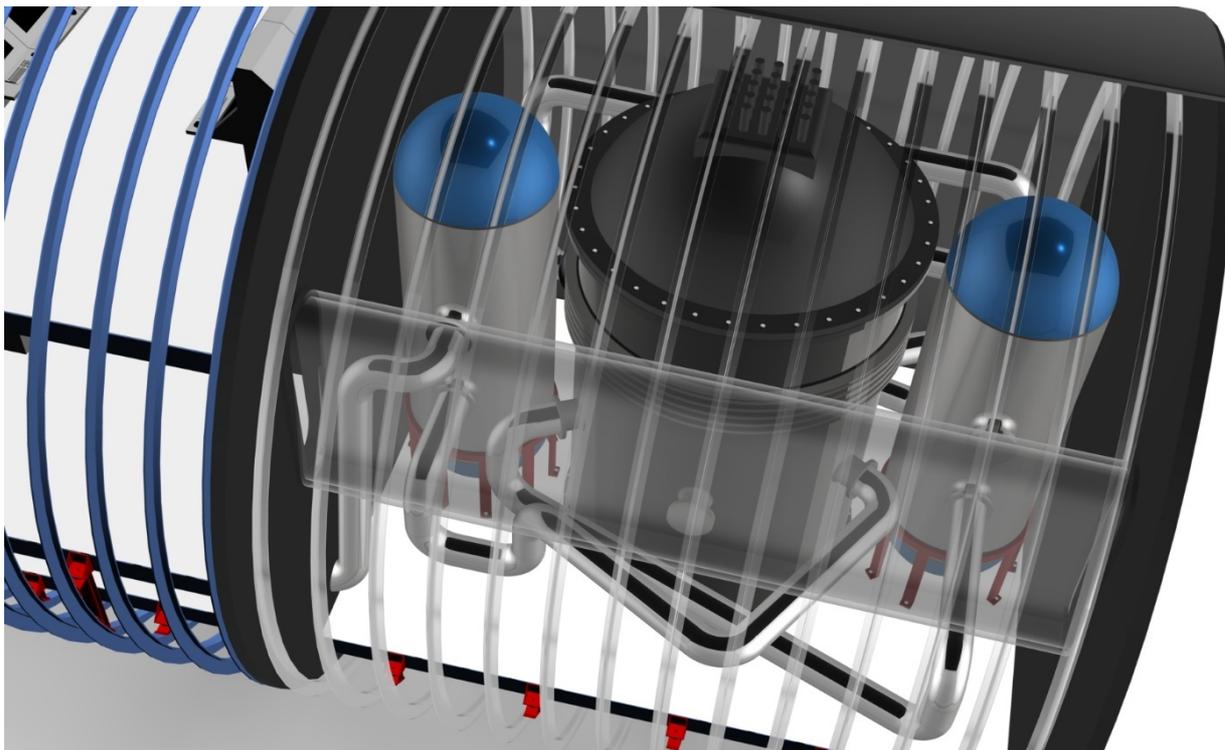


Figura 2 – Detalhe dos equipamentos e da tubulação dentro do Compartimento do Reator do submarino nuclear classe Virginia (SSN 774) [10].

Na Figura 3 a seguir, tem-se uma vista isométrica em detalhe explicitando os equipamentos do compartimento do reator do submarino USS VIRGINIA (SSN 774). Ainda podem ser observados alguns detalhes de seções a ré adjacentes ao compartimento do reator.

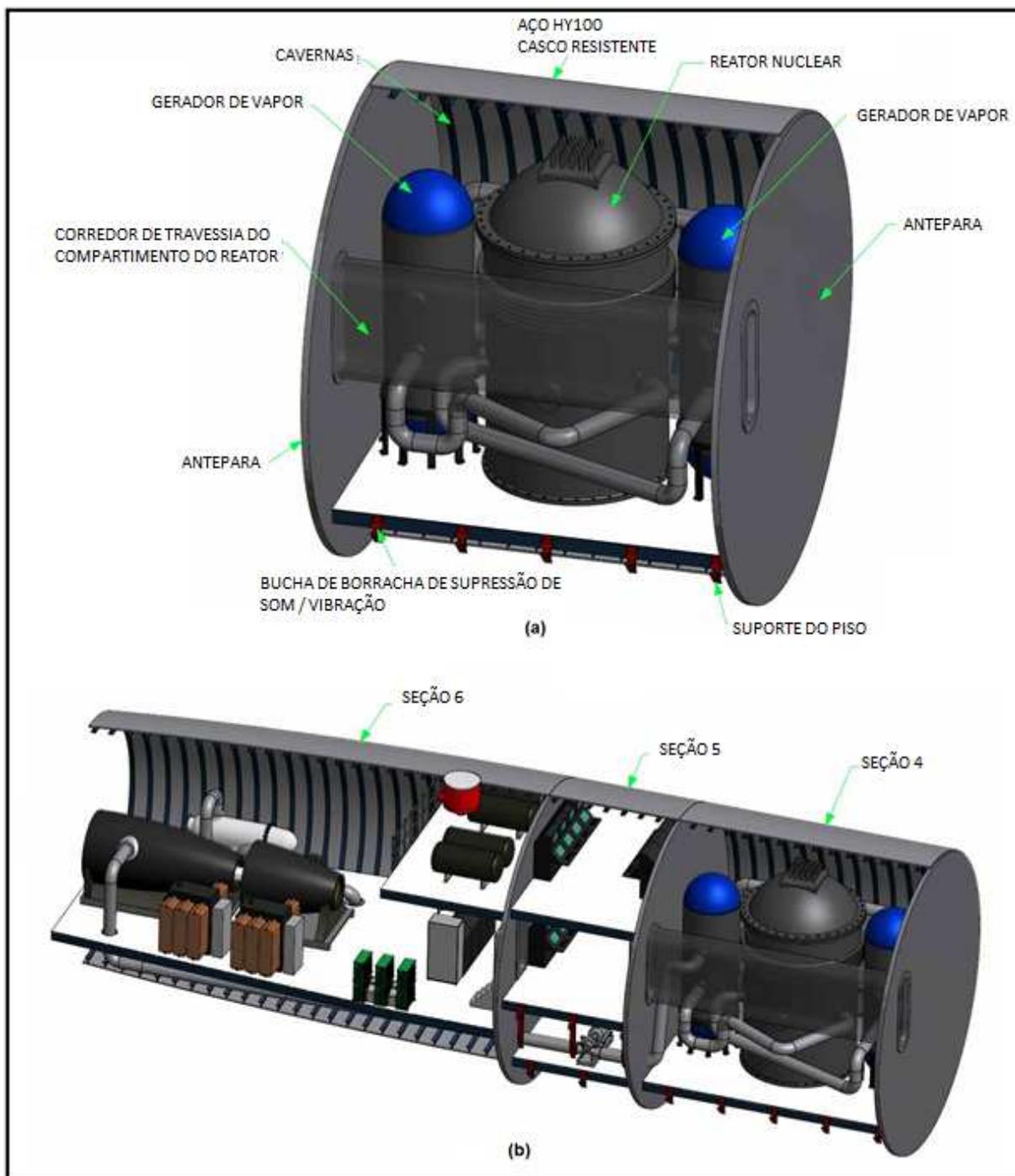


Figura 3 – (a) Visualização do compartimento do reator do submarino nuclear Virginia SSN 774; (b) Representação da Seção 4 (Compartimento do Reator); Seção 5 (Sala de Controle da Propulsão) e da Seção 6 (Compartimento das Turbinas) do submarino classe Virginia [10].

2.2 MECANISMOS DE ATIVAÇÃO DOS MATERIAIS

As usinas de propulsão naval movidos a energia nuclear continuam sendo uma fonte de radiação mesmo depois que os navios são desligados e o combustível nuclear é removido. A remoção dos elementos combustíveis queimados remove todos os produtos de fissão, uma vez que o elemento combustível é projetado, construído e testado para garantir que contenha os produtos de fissão. Contudo, mesmo após a retirada dos elementos combustíveis, mais de 99,9% do material radioativo que permanece é parte integrante das ligas estruturais que formam os componentes da usina nuclear. A radioatividade é originada a partir da irradiação por nêutrons do ferro e dos elementos de liga nos componentes metálicos durante a operação da planta nuclear. O material radioativo remanescente (0,1%) são produtos de corrosão e desgaste que circularam pelo líquido de arrefecimento do reator, tornando-se radioativos em consequência da exposição a nêutrons no núcleo do reator e, em seguida, depositados nas partes internas do sistema de tubulação [5]. Na Figura 4 a seguir tem-se uma representação esquemática do mecanismo de ativação dos materiais no compartimento do reator.

Os nêutrons emergindo da reação de fissão atingem os materiais adjacentes do reator, ativando-os por meio de uma reação de absorção. Os materiais ativados decairão emitindo radiação e partículas secundárias, o que provavelmente implicará em valores perigosos de taxa de dose, que devem ser cuidadosamente estudados.

O líquido de arrefecimento do reator transporta alguns desses produtos radioativos através dos sistemas de tubulação, nos quais uma parte da radioatividade é removida por um sistema de purificação. A maioria dos radionuclídeos restantes transportados do núcleo do reator são depositados na tubulação do circuito primário [5]. Esses nêutrons, quando absorvidos no núcleo de um átomo não-radioativo, como por exemplo o ferro 54, podem produzir um átomo radioativo, o ferro 55. Em algum momento posterior, ele se transforma em um átomo de manganês 55, não radioativo, liberando energia na forma de radiação. Isso é chamado de decaimento radioativo [5].

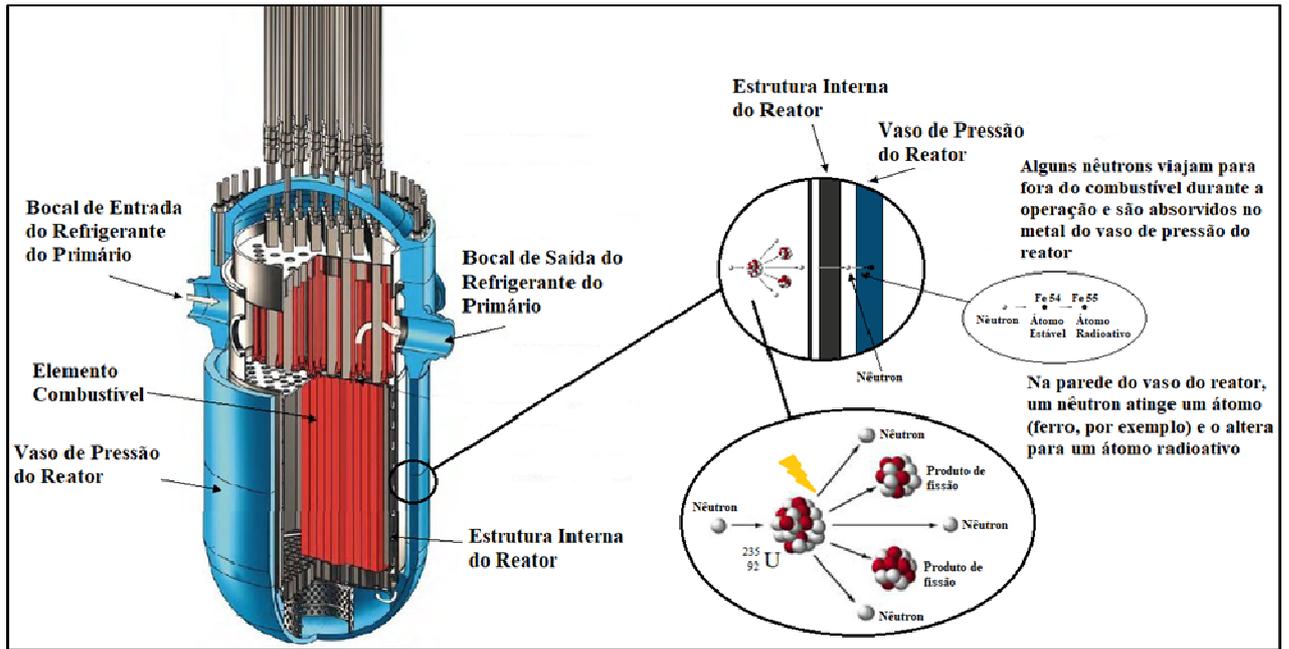


Figura 4 – Representação do mecanismo de ativação dos materiais no compartimento do reator.

A maioria dos materiais são sensíveis às interações de nêutrons, resultando em um estado excitado dos núcleos remanescentes. Frequentemente, a maneira de retornar ao seu estado fundamental é liberar energia na forma de radiação. Quando a radiação corresponde a partículas alfa ou beta não constitui uma preocupação especial se ocorre dentro dos materiais. Entretanto, quando a radiação emitida for gama, as análises de ativação serão realizadas para avaliar o termo de fonte gama. Vale ressaltar que este termo de fonte gama é particularmente importante no caso do desligamento do reator, quando as operações de manutenção são normalmente realizadas.

A principal fonte de radiação dentro do compartimento de um reator é o cobalto-60, que é depositado dentro dos sistemas de tubulação. O cobalto-60 emite dois fótons gama de energia elevada e uma beta de energia pequena para cada decaimento radioativo. E possui uma meia-vida de 5,27 anos. O cobalto-59, o nuclídeo-pai, é uma impureza comum em aços carbono resistentes a corrosão e aços inoxidáveis austeníticos, assim como em concretos [5].

Outros elementos que também são importantes produtos de ativação em aços são o Ferro-55 (meia vida = 2,7 anos) e o Manganês-54 (meia vida = 0,86 ano), especialmente no caso de uma atividade imediatamente após o desligamento do reator. Além disso, Níquel-63 é de particular importância para os aços inoxidáveis, onde o teor de Níquel-62 é geralmente maior que o dos aços carbono [5].

O modelo de blindagem radiológica que será estudada para uma PNM será equivalente àquela utilizada em submarinos nucleares americanos. O núcleo do reator é instalado em um vaso de pressão com paredes pesadas dentro de uma blindagem primária. A blindagem primária limita a exposição à radiação gama e nêutrons produzidos quando o reator está operando. Os sistemas de tubulação da planta do reator são instalados principalmente dentro de um compartimento do reator que é cercado por uma blindagem secundária. O acesso ao compartimento do reator é permitido somente após o reator ser desligado [5].

Deve ser lembrado que no caso do submarino a blindagem do reator nos põe vários problemas maiores do que para um navio de superfície ou uma usina nuclear de terra. Em primeiro lugar o reator não deve ser colocado em uma das extremidades do submarino por questão de estabilidade (equilíbrio). Portanto deve ser colocado próximo ao centro da embarcação. Em consequência disso, para a tripulação transitar no submarino precisa atravessar por um corredor muito próximo ao vaso do reator. A proteção desse corredor também faz parte da blindagem secundária. Na Figura 2 e na Figura 3 pode ser visualizado o corredor que atravessa o compartimento do reator.

Os nêutrons (produzidos durante as fissões do combustível do reator) também são protegidos pelas blindagens primárias e secundárias. A exposição à radiação do pessoal desses nêutrons durante a operação do reator é muito menor do que a radiação gama. De acordo com o relatório [5], após o desligamento do reator, quando o estaleiro e outras operações de apoio são executadas, nenhuma exposição a nêutrons é detectada. Portanto, as exposições à radiação discutidas nesta dissertação serão quase todas de radiação gama.

A exposição do vaso do reator e de componentes externos ao vaso, a campos de radiação intensos leva à ativação nuclear de materiais e à produção de radioisótopos que são de fundamental relevância: 1) com relação às atividades de operação e manutenção; e 2) no que diz respeito à desmontagem (por exemplo, conceitos de manuseio de materiais, embalagem e logística).

Os resultados de uma simulação pelo método de Monte Carlo realizada em um compartimento de um reator nuclear, demonstrou que as taxas de dose ao redor dos materiais ativados ocasionam dois problemas principais: o primeiro diz respeito aos riscos

radiológicos associados à exposição humana aos componentes ativados, seja nos casos de manutenção e inspeção, ou seja, sempre ao extraí-los e deslocá-los para outros locais; o segundo está relacionado a danos causados por radiação ao próprio equipamento, incluindo os componentes de segurança e controle, que devem ser mantidos em condições adequadas para permitir a operação segura.

2.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO

A exposição à radiação pode danificar células vivas, causando a morte de algumas e modificando outras. A maioria dos órgãos e tecidos do corpo não são afetados pela perda, até de um número considerável, de células. No entanto, se o número perdido for grande o suficiente, haverá danos observáveis aos órgãos que podem levar à morte. Esse dano ocorre em indivíduos que são expostos à radiação acima de um valor limiar. Outros danos de radiação também podem ocorrer em células que não são mortas, mas modificadas. Este dano geralmente é reparado. Se o reparo não for perfeito, a modificação resultante será transmitida a outras células e pode levar ao câncer. Se as células modificadas forem aquelas que transmitem informações hereditárias aos descendentes do indivíduo exposto, podem surgir distúrbios hereditários [11].

De acordo com o UNSCEAR Report [11] não existe uma dose segura de exposição de radiação sob o ponto de vista genético, sendo que qualquer exposição à radiação pode envolver um certo risco de indução de efeitos hereditários e somáticos. As vias de produção dos efeitos biológicos podem ser por deposição direta da radiação (nêutrons, prótons, partículas alfas etc.) ou por deposição indireta (radiólise da água e ionizações secundárias), podendo desencadear o aparecimento de efeitos tardios estocásticos e efeitos agudos reações do tecido (antigos “determinísticos”).

O uso apropriado, a correta especificação e seleção de um equipamento de proteção radiológica, para uma determinada atividade específica, atua na redução tanto na incidência direta como na indireta da radiação nos tecidos e órgãos. Portanto, esta atividade está diretamente relacionada com o fundamento dos princípios básicos de proteção radiológica, que é proteger os indivíduos, seus descendentes e a humanidade dos efeitos biológicos da radiação.

2.4 PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Sendo as VPRs considerados equipamentos de proteção individual que colaboram para redução dos efeitos nocivos da radiação, bem como para o atendimento dos princípios de proteção radiológica, estes serão aqui resumidamente apresentados.

2.4.1 PRINCÍPIO DA JUSTIFICAÇÃO

O princípio da justificação, diz que as doses serão justificadas pelos benefícios esperados do procedimento. Este princípio foi introduzido visando eliminar as aplicações da radiação ionizante em atividades que não fornecem um benefício para a população e, portanto, não se justificam. Nenhuma prática ou fonte associada a essa prática será aceita pela CNEN, a não ser que a prática produza benefícios, para os indivíduos expostos ou para a sociedade, suficientes para compensar o detrimento correspondente, tendo-se em conta fatores sociais e econômicos, assim como outros fatores pertinentes [4].

2.4.2 PRINCÍPIO DA OTIMIZAÇÃO

O princípio da otimização, também conhecido como princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), diz que as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto racionalmente exequível, considerando os aspectos econômicos e sociais. Dentre os princípios de proteção radiológica, o princípio da otimização é o que foi utilizado para apontamento da melhor vestimenta de proteção radiológica. Para tanto, na seção 3.2 serão aplicadas as técnicas de ajuda na tomada de decisão, ou técnicas de otimização, da publicação 55 – CIPR de 1989 [12], que foram selecionadas para o consecução do presente trabalho. Segue uma breve definição dos termos utilizados pelas técnicas de otimização, contextualizando para o estudo das VPRs.

Com relação ao princípio de otimização a CNEN diz que às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, manutenção nuclear por exemplo, 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 [4].

A opção de proteção é determinada por meio de um projeto específico de proteção ou um conjunto de procedimentos operacionais específicos. Para o presente estudo, cada uma das vestimentas selecionadas para a pesquisa será considerada uma opção de proteção. A opção inicial para avaliação das alterações propostas no processo de otimização é conhecida como caso básico. O caso básico para este trabalho será a vestimenta de plástico comumente utilizada por funcionários de centrais nucleares.

Entende-se por custo da opção o custo financeiro direto para aquisição e recursos da opção, juntamente com quaisquer outros custos, por exemplo, acessórios necessários para complementar a proteção de certos tipos de vestimentas. São conhecidos como desempenho da opção de proteção os resultados fornecidos por ela, tanto na aplicação de uma opção de proteção, atenuação da radiação ionizante, bem como comprovada qualidade na utilização da vestimenta.

Os fatores de proteção radiológica são aqueles relacionados ao grau de proteção a ser obtido. Um atributo (ou fator) a ser considerado no processo de otimização da proteção é, necessariamente, uma medida identificada do custo ou do desempenho, como o custo financeiro, dose coletiva, dose individual máxima, exigências de treinamento, desconforto causado pela roupa protetora, entre outros. Para a seleção das vestimentas serão considerados os seguintes atributos (ou fatores) para consecução deste trabalho: custo de proteção (X), capacidade de atenuação da radiação ionizante (A), peso da vestimenta (P), conforto da vestimenta (C) e descontaminação superficial (D).

Há ainda outros fatores a serem considerados no processo de tomada de decisão. Entende-se por outros fatores aqueles que, estando relacionados ou descrevendo o desempenho ou ainda o custo de uma opção de proteção, não estão relacionados com o grau de proteção obtido. Além dos fatores, há que se considerar os critérios, que são medidas qualitativas do que é aceitável ou desejável para um ou mais fatores. O critério é a base contra a qual o desempenho ou o custo de uma operação pode ser comparada. São exemplos de critérios os limites de dose individuais, ou um valor específico de dose coletiva.

A partir de então, por meio das técnicas de ajuda para tomada de decisão em proteção radiológica, pode-se determinar a opção ótima. A VPR considerada como opção ótima será

aquela que apresentar o melhor resultado de acordo com determinada técnica utilizada. Podendo variar de acordo com a técnica utilizada, e com os fatores selecionados.

A técnica de ajuda para tomada de decisão mais simples é a análise custo-benefício. São dois os critérios que sempre devem ser utilizados por esse processo de otimização da proteção: o valor alfa e os limites de dose anuais tanto para os trabalhadores como para o público, se estes últimos estiverem envolvidos.

Nesse caso, pode-se considerar a opção ótima como sendo aquela que minimiza a expressão:

$$X + \alpha S$$

onde:

X é o custo de radioproteção;

S é o compromisso de Dose Efetiva Coletiva;

α é o coeficiente monetário.

Esta técnica nem sempre é aceita quando forem necessários outros atributos além da dose coletiva e do custo de proteção. Um problema de proteção mais complexo implica uma decisão também complexa. Voltando-se para o caso atual de seleção da VPR, não temos o valor de dose coletiva (S) para o cálculo do detrimento da radiação, além de que serão utilizados também outros fatores para obtermos a opção ótima. Portanto, a técnica custo benefício não será utilizada para a seleção das VPRs.

Segundo PEREZ [13], a análise de prioridades com atributos múltiplos possibilita a introdução de tantos atributos quantos se queira e os aceita com funções de qualquer tipo, como por exemplo, exponenciais, logarítmicas, quadráticas, etc. É uma técnica agregativa, uma vez que são considerados todos os atributos juntos para cada uma das opções e, em seguida, é escolhida a opção ótima, dentre todas as opções formuladas. Já a análise com critérios múltiplos excedentes, em vez de escolher a opção ótima entre todas as opções de proteção radiológica disponíveis, compara as opções aos pares e daí seleciona a opção ótima. Em outras palavras, compara uma opção i com todas as demais m , de modo a avaliar se a opção i excede ou é preferida à opção m . Esta técnica é útil quando os fatores são

heterogêneos, ou quando as incertezas são grandes, ou ainda quando os fatores só podem ser analisados de maneira qualitativa, como por exemplo, no caso de estudos de aceitação pública.

A CIPR considera seis técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão para a otimização da proteção radiológica: análise custo-eficácia; análise custo benefício diferencial; análise custo-benefício integral; análise custo-benefício expandido; análise de prioridades com atributos múltiplos e análise de critérios múltiplos excedentes. A solução analítica é apresentada pela opção de proteção considerada ótima em um processo de otimização de acordo com a técnica escolhida para a tomada de decisão. A CIPR deliberadamente absteve-se de recomendar uma técnica particular. Parte-se do pressuposto que a solução analítica depende dos fatores (atributos) e critérios utilizados e independe da técnica de ajuda a tomada de decisão escolhida [14].

A CIPR espera que a maior parte das situações não exija uma técnica mais complexa do que a análise de custo-benefício integral ou expandida. No entanto, recomenda a consideração das técnicas mais aceitáveis para cada caso, especialmente a análise de prioridades com atributos múltiplos, pelo discernimento no tratamento dos atributos difíceis de serem quantificados e pelo desenvolvimento da compreensão que ela pode estimular [14]. Como já explicado anteriormente, não será possível realizar a análise custo-benefício para o estudo das vestimentas, e, portanto, somente serão apresentadas as técnicas que serão posteriormente utilizadas para definição da solução analítica, com suas devidas adaptações.

Partindo-se do número de atributos selecionados para análise, bem como dos critérios de seleção adotados para apontamento da VPR ótima com foco em atenuação da radiação ionizante e no conforto na utilização por trabalhadores da área de manutenção nuclear, foram selecionadas duas técnicas introduzidas pela publicação 55 da CIPR [12], em 1989, para ajuda na tomada de decisão em proteção radiológica (ou melhor, técnicas de otimização), são elas: **Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos** (nome original em inglês, *Multi-Attribute Utility Analysis*) e **Análise com Critérios Múltiplos Excedentes** (nome original em inglês, *Multi-Criteria Outranking Analysis*).

É evidente que, geralmente, para a maior capacidade de atenuação das vestimentas, ou seja, menores doses no IOE, teremos as vestimentas de proteção mais caras e que para as

vestimentas de menor capacidade de atenuação, logo, maiores doses no IOE, as opções de vestimentas mais baratas. Portanto, para se levar em conta todos os atributos selecionados para escolher a melhor vestimenta de proteção radiológica, a opção ótima será obtida por meio da aplicação das técnicas de ajuda para tomada de decisão; que serão discutidas sucintamente nas seções 2.4.2.1 e 2.4.2.2, a seguir. Estas técnicas nos fornecerão a opção que satisfaz o princípio da otimização. Deve-se então salientar que a opção de proteção ótima passa a ser a obrigatória do ponto de vista normativo, mas não exclui a possibilidade do tomador de decisão selecionar uma opção mais cara que forneça um nível de segurança maior. Desta maneira, a opção ótima obtida pelo uso das técnicas de ajuda para a tomada de decisão pode ser considerada como a opção mais barata normativamente aceita [13].

2.4.2.1 ANÁLISE DE PRIORIDADES COM ATRIBUTOS MÚLTIPLOS

Quando os atributos de radioproteção são numerosos, outras técnicas mais flexíveis podem ser adequadas. Uma destas é a análise de prioridades com atributos múltiplos que possibilita a inclusão de atributos difíceis de serem quantificados em termos monetários. Esta técnica evoluiu de várias disciplinas, como a psicologia, engenharia e ciência gerencial.

Nesta técnica são associados pontos aos atributos pertinentes ou uma função de prioridade com atributos múltiplos. Dessa maneira, se os pontos para opção i forem superiores aos da opção m então, por definição, i tem preferência sobre m . Se os pontos forem iguais para as duas opções, então não existirá preferência de uma opção sobre a outra. Em resumo, na análise de atributos múltiplos a solução analítica é dada pela opção que torna a função prioridade total, U_i , máxima.

Após quantificar as opções de proteção radiológica e especificar os atributos, devem-se incluir critérios para classificar a importância de cada atributo em relação aos demais. Para isso, introduz-se uma função de prioridade u_j para cada atributo j , à qual fornece a conveniência relativa do possível resultado para o atributo j . Geralmente, ao melhor resultado ou a consequência de menor adversidade para cada atributo (por exemplo, custo da proteção menor, maior capacidade de atenuação, menor peso, etc) é atribuída uma prioridade $u_j = 1$ e a pior consequência uma prioridade $u_j = 0$.

A partir das funções de prioridades simples, u_j , expressando as várias prioridades dos n atributos associados a cada opção de proteção, i , deve ser obtida uma função com atributos múltiplos, U_i , que fornece a prioridade total de cada opção i . Essa função de prioridade total pode ser definida pela equação:

$$U_i = \sum_{j=1}^n k_j u_j$$

Onde,

n = número de atributos;

U_i = função de prioridade total;

k_j = constante de crescimento, fornece a importância relativa de cada atributo;

u_j = função de prioridade parcial para cada atributo.

As constantes de crescimento podem ser conseguidas de duas maneiras: por avaliação direta e por razões de substituição.

Na avaliação direta tem-se que a constante de crescimento para o custo de proteção $k(X)$, está para o intervalo de custo de proteção, $R(X)$, assim como a constante de crescimento da dose coletiva $k(S)$, está para o intervalo de custo de detrimento, $\alpha R(S)$, onde $R(S)$ é o intervalo de doses coletivas e conseqüentemente para os demais atributos. É uma técnica muito parcial, pois relaciona a importância dos atributos de acordo com seu intervalo de variação.

As constantes de crescimento, k_j , pela técnica de avaliação por razões de substituição podem ser determinadas dispondo a importância de cada fator em ordem decrescente, de acordo com a conveniência do tomador de decisão, em seguida, é estabelecido a importância relativa de cada fator percentualmente com relação ao fator mais importante. Estes valores são por fim normalizados. Este foi o método selecionado para determinação das constantes de crescimento, sendo o **atributo de atenuação à radiação o mais importante** para a seleção das vestimentas.

As constantes de crescimento, geralmente, são normalizadas de modo que:

$$\sum k_j = 1$$

2.4.2.2 ANÁLISE DE CRITÉRIOS MÚLTIPLOS EXCEDENTES

Há um grande diferencial entre a técnica de análise com critérios múltiplos excedentes e as demais técnicas de ajuda para a tomada de decisão. As demais técnicas são conhecidas como agregativas, uma vez que combinam todos os atributos em uma única figura de mérito, como o custo total na análise custo-benefício ou uma função de prioridades na análise de prioridades com atributos múltiplos. Já a técnica da análise com critérios múltiplos excedentes compara cada opção i com os demais m , e ainda se a opção i excede (ou é preferível) à opção m para cada atributo j .

Para técnicas de tomada de decisão usadas no processo de otimização radiológica conhecidas como agregativas devem ser satisfeitas duas condições: todos os atributos devem ser necessários e o desempenho pobre de um atributo é compensado pelo melhor desempenho de outros atributos. As técnicas agregativas apresentam dificuldades quando os atributos são muito heterogêneos ou quando só podem ser avaliados de maneira qualitativa. Como por exemplo de dificuldades, podemos citar a aceitação público ou o impacto sobre as relações da equipe. Outro exemplo seria quando as opções de proteção são completamente opostas, como uma comparação entre o custo de proteção mínimo e o detrimento máximo com relação ao custo máximo e o detrimento mínimo quando as somas forem iguais.

A técnica de análise com critérios múltiplos excedentes apresenta vantagens sobre as técnicas agregativas no processo de otimização da proteção radiológica quando os atributos das opções de proteção são muito heterogêneos. Isso ocorre quando não podem ser ordenados de forma crescente ou decrescente com relação às opções ou quando só podem ser avaliados de maneira qualitativa.

As bases da técnica de análise de critérios múltiplos excedentes usadas na otimização da proteção radiológica são duas, a saber:

1. Indicador de vantagem (Ad) – expressa o quanto a opção i é preferível à opção m ;

- Quando i for preferível ou equivalente à m para todos os atributos j :

$$Ad_{i,m} = 1$$

- Quando i não for preferível à m para todos os atributos j :

$$Ad_{i,m} = 0$$

- Quando i for preferível ou equivalente a m para alguns dos atributos j :

$$0 < Ad_{i,m} < 1$$

No cálculo de $Ad_{i,m}$ é possível incorporar critérios de vantagens, como na análise de prioridades com atributos múltiplos, fazendo uso das constantes de crescimento k_j :

$$Ad_{i,m} = \sum k_j a_j$$

Onde a_j é o indicador de vantagem para o atributo j e $a_j = 1$ se a opção i for melhor do que a opção m para o atributo j , caso contrário $a_j = 0$.

2. Critério de exclusão (Ec) – expressa em que grau as desvantagens da opção i , em relação à opção m , são significativas para os atributos em relação aos quais i é preferível à m . Esse critério rejeita todas as opções que não cumpram os requisitos fundamentais:

- Quando os prejuízos associados à escolha da opção i , em vez de m , são muito grandes. $Ec_{i,m} = 1$; e
- Quando os prejuízos associados à escolha da opção i , em vez de m , são muito pequenos. $Ec_{i,m} = 0$.

Deve-se definir o ponto onde o prejuízo torna-se “muito grande”, conhecido como “limiar de exclusão”. Se um atributo for julgado “não suficientemente importante” para eliminar as opções, o limiar de exclusão deve ser escolhido de modo a impedir que a comparação entre pares de um critério de exclusão resulte em 1.

Para escolha da técnica mais adequada em cada processo de otimização é importante a análise inicial do problema, a identificação e quantificação dos atributos importantes e adotar julgamentos explícitos em relação aos critérios para comparar o desempenho e o custo das opções tornando o processo de análise mais claro.

2.4.3 PRINCÍPIO DA LIMITAÇÃO DE DOSE

Por último, tem-se o princípio da limitação de dose, que considera que a qualquer dose, por menor que seja, está associado a um risco, isto é, a probabilidade de sofrer um efeito deletério como resultado de uma dose de radiação. Os limites de dose individuais foram estabelecidos no intuito de limitar o aparecimento dos efeitos tardios e de evitar os efeitos de reações do tecido, fixando limites tão pequenos que dificilmente serão atingidos esses efeitos. Os limites de dose anuais não devem exceder os limites recomendados pela CIPR. No que tange aos trabalhadores, as doses individuais de corpo inteiro recebidas podem ser divididas em três regiões, a saber: aceitável (doses menores que 5mSva^{-1}), tolerável (doses entre 5mSva^{-1} e 50mSva^{-1}) e inaceitável (doses superiores a 50mSva^{-1}).

As doses de radiação não devem ser superiores aos limites estabelecidos pelas normas de cada país. No Brasil os limites de doses anuais foram estabelecidos para os trabalhadores e para o público, como consta no item 5.4.2.1 da norma CNEN NN 3.01[4], e que está apresentado na Tabela 1.

No processo de evolução do princípio de limitação de dose, foram desenvolvidos alguns conceitos de Dose Efetiva, de Dose Equivalente e da própria evolução da contribuição dos órgãos para o Detrimento Total. Na maioria das situações práticas, a exposição do corpo humano está sujeita a irradiação de mais de um tecido ou órgão, e, portanto, a CIPR acredita que, para os efeitos estocásticos, é apropriado recomendar um limite de dose equivalente baseado no risco total de todos os tecidos irradiados (corpo inteiro). Este sistema de limite de dose incorpora os seguintes aspectos:

- Um limite para a irradiação uniforme de corpo inteiro expressa pela Dose Efetiva, E;
- Um sistema para assegurar que o risco total da irradiação de partes do corpo não exceda a irradiação uniforme do corpo inteiro, dado pelos fatores de ponderação do tecido, (W_T).

Tabela 1 – Limites de dose Anuais para IOE e para o público no Brasil CNEN NN 3.01[4].

Limites de Dose Anuais [a]			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE)	Indivíduo do público
<i>Dose efetiva</i>	Corpo inteiro	20 mSv [b]	1 mSv [c]
<i>Dose equivalente</i>	Cristalino	20 mSv [b] (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)	15 mSv
	Pele [d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

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

[b] média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

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

[d] valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

A Dose Efetiva (E), introduzida na publicação 60 do CIPR [15], é a grandeza relacionada ao risco em proteção radiológica e é definida como a soma ponderada das doses equivalentes, H_T, nos tecidos ou órgãos, cada um multiplicado por um fator de ponderação apropriado. A seguir tem-se a equação para determinação da Dose Efetiva.

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T$$

$$E = \sum_T W_T H_T = \sum_T W_T (\sum_R W_R \bar{D}_{R,T})$$

Onde:

- H_T é a dose equivalente em um órgão ou tecido T;
- W_T é o fator de ponderação do tecido ou órgão T, e W_T = 1 para o corpo inteiro;
- D_{T,R} é a dose média absorvida em um órgão ou tecido T para a radiação do tipo R;
- W_R é o fator de ponderação da radiação para a radiação R.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo da evolução dos fatores de ponderação nos tecidos e órgãos, acordo com as publicações 26, 60 e 103 CIPR. No princípio, houve uma concentração destes fatores, principalmente em órgãos da região torácica e do quadril. De acordo com as publicações seguintes da CIPR, houve um maior detalhamento dos órgãos e tecidos radio sensíveis, além de uma atualização significativa dos fatores de ponderação, contudo ainda é possível concluir que a região mais crítica, ou seja, com os tecidos e órgãos mais sensíveis à radiação, permanece sendo a mesma e, portanto, para fins de proteção radiológica individual, devendo ser a principal área protegida em casos de exposição ocupacional do trabalhador.

Tabela 2 – Evolução dos fatores de ponderação dos tecidos, W_T .

Tecido ou Órgão	<i>CIPR-26 (1977)</i>	<i>CIPR-60 (1991)</i>	<i>CIPR-103 (2007)</i>
Superfície Óssea	0,03	0,01	0,01
Bexiga	-	0,05	0,04
Mama	0,15	0,05	0,12
Cólon	-	0,12	0,12
Gônadas	0,25	0,20	0,08
Fígado	-	0,05	0,04
Pulmão	0,12	0,12	0,12
Esôfago	-	0,05	0,04
Medula Óssea Vermelha	0,12	0,12	0,12
Pele	-	0,01	0,01
Estômago	-	0,12	0,12
Tireoide	0,03	0,05	0,04
Glândulas Salivares, Cérebro	-	-	0,01
Restante	0,30	0,05	0,12
Total (Corpo Inteiro)	1,0 (7)	1,0 (13)	1,0 (15)

2.5 REVISÃO DAS VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA (VPRs)

Nesta seção será apresentado um breve histórico da publicação da AIEA, Safety Series 22 [1], que foi uma das percussoras na seleção e no alerta ao uso de vestimentas de proteção radiológicas, além da revisão dos principais trabalhos realizados, visando o desenvolvimento das vestimentas de proteção radiológicas.

2.5.1 HISTÓRICO DE SELEÇÃO DAS VPRs

Em 1967 foi elaborado pela IAEA um guia para auxiliar os responsáveis da proteção radiológica na seleção de vestimentas e de equipamentos de respiração para trabalhadores de instalações nucleares. No referido documento são apresentados inúmeros equipamentos de proteção à radiação ionizante e suas respectivas indicações para uso, apontando a importância que se deve dar aos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE).

De acordo com o que foi indicado na publicação da IAEA [1] o básico para se selecionar um EPI radiológico é conhecer bem a atividade e o que se pretende evitar: contaminação da pele, inalação e/ou ingestão de isótopos radioativos ou outros materiais tóxicos e qual é o tipo de radiação gama (γ), raios-X ou beta (β) na qual o IOE será exposto. Com isto, nesta publicação foram apresentados diferentes equipamentos por área onde se deseja proteção: Sistema Respiratório, Cabeça, Braços e Mãos, Pernas e Pés e, Corpo, entre outras. Nenhuma das vestimentas apresentava uma proteção integral do IOE, e para se atingir este objetivo, deveriam ser utilizados vários equipamentos simultaneamente.

Já foi ressaltado a importância de prover VPRs adequadas para uso em situações ocupacionais normais, de manutenção de uma usina nuclear de potência e, em caso de emergências nucleares, devem ser utilizados EPIs radiológicos, a fim de proporcionar uma proteção satisfatória aos IOEs.

Para evitar a contaminação superficial, vestimentas de proteção feitas com plástico podem ser muito úteis, mas se a temperatura ambiente for maior do que 25°C se torna muito quente e deve ser resfriado com fornecimento de ar, ou o cansaço térmico será um problema para a atividade [1]. Um modelo de vestimenta, frequentemente usada para trabalhos com raios X ou trabalhos com radioisótopos emissores de raios gama de energia pequena, pode ser

observado na Figura 5. De acordo com a publicação [1] esta vestimenta utilizava borracha impregnada com chumbo que era efetiva em reduzir a dose de corpo inteiro para o trabalhador, embora fosse um pouco pesada, mas era o que se tinha na época para o trabalho em alguns tipos de laboratórios.



Figura 5 – VPR modelo B12 para trabalho com raios X e raios gama de energia pequena [1].

Até o acidente nuclear de Fukushima, pouco se tinha de modelos comprovadamente eficazes para proteção das equipes de combate em acidentes nucleares, bem como para uso em manutenção de ambientes confinados, como por exemplo, de reatores nucleares, tendo sido dado enfoque principalmente às vestimentas com descontaminação superficial. Mais recentemente, após esse trágico acidente, diversos estudos científicos têm apontado novos

materiais capazes de fornecer maior proteção à radiação ionizante, aliado a uma elevada capacidade de descontaminação superficial, melhor conforto térmico, além serem equipamentos ergonômicos em comparação aos anteriormente disponíveis. Muitas destas pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais, tem sido fomentadas por empresas da área de proteção radiológica, para aplicação em diferentes produtos.

Apesar do uso dessas vestimentas de proteção radiológica ainda estarem muito associadas aos acidentes nucleares e sendo conhecido, no longo prazo, que a maior parte da taxa de dose nos IOEs sejam das atividades de inspeção, manutenção e reparo dentro do compartimento do reator [5], é conveniente, e satisfaz o princípio ALARA, se pudéssemos utilizar também essas novas vestimentas em condições normais de operação e manutenção de centrais nucleares.

2.5.2 ESTADO DA ARTE: MATERIAIS USADOS NA CONFECÇÃO DAS VPRS

Aqui serão apresentados os últimos trabalhos realizados visando o desenvolvimento de materiais usados nas vestimentas de proteção radiológica.

Em trabalho elaborado por SU et al. [16], foram determinados os coeficientes de atenuação de seis materiais, para radiação gama e Raios-X, com diferentes energias. Algumas das conclusões, já previamente conhecidas, foram confirmadas pelo recente artigo, por exemplo: que os raios gama ao passar através de materiais com número atômico elevado, causam prontamente o efeito fotoelétrico e em materiais com número atômico pequeno, causam o efeito Compton; o coeficiente de atenuação de radiação ionizante decresce com o aumento da energia de radiação gama de 100 keV até alguns MeV, mostrando a dependência do fator de atenuação com a energia de radiação; a atenuação de raios gama em materiais com número atômico elevado é maior do que em materiais com número atômico pequeno.

Roupas de proteção feitas de materiais com elevado número atômico, como chumbo e compósitos de metais pesados, foram desenvolvidas para proteção contra a exposição à radiação durante exames radiológicos. No entanto, os aventais convencionais são pesados e causam desconforto aos usuários, principalmente durante procedimentos prolongados [17], [18] e [19]. Alternativamente, uma variedade de compósitos poliméricos foi investigada em

virtude das propriedades desejáveis, como peso mais leve, trabalhabilidade e capacidade de atenuar efetivamente a radiação.

Os compósitos poliméricos leves “equivalentes a chumbo” são normalmente fabricados usando elementos de elevado número atômico incorporados em uma matriz polimérica conformável. O papel do material de enchimento com elevado número atômico é atenuar efetivamente a radiação enquanto a matriz polimérica reduz o peso total do compósito quando comparado aos materiais de blindagem convencionais [17]. No estudo realizado por MAJID et al. [18], foi desenvolvido uma proteção à radiação de raios-X à base de têxteis leves. Como resultado, foi obtido um tecido de proteção, capaz de atenuar significativamente os raios X, com relação aos aventais convencionais atuais, sendo mais intrinsecamente flexível, respirável, econômico, fácil de manter e resistente a rachaduras.

A escolha dos compostos metálicos depende principalmente do uso final, porque sua incorporação ao polímero alterará significativamente as propriedades do material polimérico. Em geral, as características desejáveis são de grande densidade, propriedades aumentadas de proteção à radiação, resistência ao calor e significativa robustez e durabilidade [20].

Tradicionalmente, as vestimentas são fabricadas com materiais químicos de blindagem com grande densidade, como chumbo ou composto misturado com ligantes e aditivos para produzir folhas de vinil carregadas com chumbo [17]. No entanto, esses materiais usados nas vestimentas são tóxicos e sujeitos a um rápido desgaste, o que requer um procedimento especial de descarte [21]. Além disso, essas vestimentas causam um risco maior de lesões osteomusculares, fadiga e desconforto dos trabalhadores, o que resulta em baixa produtividade por consequência do prejuízo ergonômico causado pelas roupas [22].

De acordo com trabalhos recentes realizados por TUFAIL et al. [3], foi projetada uma vestimenta de proteção pessoal ergonômica, com uma estrutura leve e flexível e um ótimo desempenho de proteção à radiação. Nesse projeto foi proposto, a utilização de um polímero preenchido com pó de nano-tungstênio, que é um material de proteção à radiação não tóxico e sem chumbo. Os resultados experimentais apresentados por KALOSHKIN et al. [6] revelaram que o pó de nano-tungstênio dentro de uma matriz polimérica ofereceu elevada proteção à radiação ionizante, como raios X, raios gama e nêutrons térmicos.

Na investigação realizada por KIM et al. [23], foi apresentada uma nova classe de materiais de proteção à radiação gama que consiste em nanopartículas de tungstênio dispersos em matriz polimérica, cuja atenuação da radiação é bastante eficaz em comparação com suas contrapartes, contendo micropartículas de tungstênio.

Em pesquisas utilizando nanopartículas de tungstênio, de acordo com GAVRISH et al. [21], ao passar radiação gama através de amostras compostas de polímero do metal em estudo, para amostras com pequeno teor de pó de tungstênio o fator de atenuação da radiação gama permanece praticamente inalterado. Com um aumento no teor de pó de tungstênio, o fator de atenuação aumenta de forma não linear. E com um aumento do teor de tungstênio na amostra em 50%, resulta no crescimento do fator de atenuação em 5% [21].

Em trabalhos recentes publicados por AYGÜN & ALMA [19] está sendo desenvolvido um tecido leve e confortável, com alta eficiência à radiação ionizante a base de pó de óxido de bismuto (III) Bi_2O_3 , em uma matriz de tereftalato de polietileno (PET) para revestimento de um tecido poliéster por tecnologia de eletrofição. Os resultados mostraram que o desempenho da proteção à radiação ionizante dos tecidos revestidos com fibra de nanocompósito de Óxido de bismuto (III) / PET foram melhores do que os de nanofibras PET revestidos não dopados. A atenuação de raios-X aumentou com o aumento da carga de Bi_2O_3 . Apesar de estar ainda em fase de estudo, o compósito apresentou promissoras alternativas para a produção de vestimentas de proteção radiológica.

Na recente revisão conduzida por MANSOURI et al. [24], foi apontado que o uso da nanotecnologia oferece novas possibilidades na produção de materiais de proteção à radiação que são personalizáveis e apresentam alto desempenho como atenuadores de fótons. A incorporação de nanomateriais com alto número atômico em matrizes de polímero e / ou concreto permite a produção de materiais de proteção que podem substituir o chumbo como material dominante na proteção à radiação. Com base na presente revisão, concluiu-se que compósitos baseados em nanopartículas podem atenuar fótons significativamente e podem, portanto, ser usados de forma eficaz em aplicações de radiação médica; e que é promissor o uso de múltiplas nanopartículas compostas por elementos com diferentes energias de ligação da borda K. Finalmente, mais investigações experimentais e teóricas são recomendadas para

apoiar a exploração de todo o potencial das nanopartículas na tecnologia de proteção à radiação.

Um interessante trabalho de desenvolvimento de materiais compósitos flexíveis para aplicação em proteção radiológica foi apresentado no artigo Kalkornsurapranee et al. [25] onde foram utilizados os seguintes materiais de enchimento: carbonato de bário (BaCO_3), óxido de bismuto (Bi_2O_3) e sulfato de bário (BaSO_4) em matriz de borracha natural. De acordo com o pesquisador, esse compósito oferece flexibilidade, peso leve e é livre de chumbo, o que permite o uso seguro e sendo ao mesmo tempo bom para o meio ambiente. Dentre as principais vantagens observadas foram desenvolvidos materiais de densidade pequena, boas propriedades mecânicas e considerável atenuação de radiação gama e X, podendo ser utilizado em diversas aplicações. As melhores propriedades de atenuação da radiação ionizante foram obtidas pela amostra de borracha natural com Bi_2O_3 , bem como obteve os mais elevados valores de coeficiente de atenuação de massa total, chumbo equivalente, e valores de camada semi redutora (*Half Value Layer, HVL*) em comparação com as outras amostras.

Na revisão da literatura realizada pode-se comprovar a notória contribuição dos trabalhos de pesquisa no desenvolvimento de novos materiais compósitos com foco na atenuação da radiação e buscando a fabricação de vestimentas mais leves e confortáveis, o que apontam para o estado da arte no desenvolvimento das vestimentas de proteção radiológicas, apresentando soluções para os principais problemas das vestimentas convencionais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As principais atividades para consecução deste trabalho foi a realização do levantamento das VPRs disponíveis e a aplicação das técnicas de ajuda na tomada de decisão da publicação 55 da CIPR.

Para poder selecionar a melhor VPR existente no mercado foi realizada uma pesquisa exaustiva com fornecedores de VPRs em diversos países. A pesquisa foi realizada em websites dos fornecedores na internet, catálogos, contato por e-mail, chats, artigos publicados em revistas, entre outros. Inicialmente serão apresentados cada um dos fabricantes, bem como os seus respectivos produtos, que serão analisados posteriormente. Em seguida será elaborado um quadro comparativo das VPRs à luz da publicação 55 da CIPR [12].

3.1 PESQUISA DAS VPRs EXISTENTES

O pessoal de resposta às emergências nucleares emprega tempo e distância para manter suas doses tão pequenas quanto razoavelmente praticável (ALARA). Ainda assim, em situações de emergência, esses bravos indivíduos podem ser inadvertidamente expostos a doses maiores do que o planejado. Nestes casos, a terceira proteção pelo princípio ALARA deve ser empregada, a blindagem. Faz bastante tempo que as vestimentas são projetadas e utilizadas para o caso de emergências e acidentes nucleares, e pouco têm se desenvolvido para aplicações convencionais de manutenção e inspeção, por exemplo. Portanto, este trabalho tem como principal objetivo buscar, dentre as principais vestimentas existentes, a que melhor poderia ser utilizada para manutenção de usinas nucleares.

Pelo exposto, fica evidente a busca por equipamentos de proteção radiológica para os profissionais da área nuclear. A VPR é usada não apenas para proteger de contaminação radioativa, mas devido às camadas de proteção especial de metais pesados ou suas ligas, elas também protegem contra a radiação ionizante penetrante. Atualmente, as VPRs vem sendo usadas por socorristas em situações de emergência nuclear, como acidentes durante o transporte de material radioativo, incidentes terroristas envolvendo dispositivos de dispersão radioativa ou armas nucleares, ou por técnicos de resposta a emergências especiais durante acidentes em instalações nucleares. No entanto, um dos principais objetivos dessa dissertação

é selecionar qual dessas vestimentas também poderiam ser usadas em períodos de manutenção programada em usinas nucleares.

Como o acesso ao compartimento do reator é permitido somente após o desligamento dele [5], onde a incidência de nêutrons é praticamente nula as principais energias a serem atenuadas pelas VPRs são as fontes de radiação produzidas pela ativação dos materiais apresentados na seção 2.2. É importante salientar que em ambientes de reatores nucleares também é muito importante a utilização de equipamentos de respiração para evitar inalação de radionuclídeos e gases nobres dispersos no ar da contenção, porém foge do escopo deste trabalho.

Outra observação que deve ser considerada na seleção, é que a VPR seja eficaz para evitar a contaminação do trabalhador e, no caso em que a roupa se contamine, possa ser de fácil descontaminação, com o mínimo de tempo necessário para efetua-la e com o menor custo financeiro. Aqui devemos considerar dois casos, a respeito do que é mais útil usar: O primeiro caso é a roupa de fácil descontaminação. Neste caso devemos considerar quantas vezes podemos descontaminar antes de ser considerada como rejeito radioativo. Ao custo total de todas as descontaminações, devemos incluir o custo do tratamento necessário como rejeito radioativo, até a sua deposição final, em local adequado. O segundo caso é usar uma roupa descartável. Neste caso, devemos considerar o seu custo e um volume muito maior de rejeito radioativo, que deverá ser tratado antes da sua eliminação final em local adequado. Evidentemente, a escolha entre os dois casos dependerá do menor custo financeiro.

No capítulo 6.15 do livro *Advances in Functional and Protective Textiles* [26] são apresentadas algumas roupas de proteção radiológica e nuclear que serão posteriormente estudadas.

Durante a pesquisa das vestimentas, alguns fabricantes disponibilizaram material complementar sobre produtos, contendo informações sobre a composição material, percentual de atenuação da radiação ionizante, instruções de uso, aplicações, bem como os respectivos relatórios realizados por laboratórios para cada uma das vestimentas. Contudo, com relação aos dados dos relatórios das pesquisas patrocinadas pelas empresas, confia-se que os resultados foram obtidos de forma ética e com profissionalismo, a fim de comprovarem a real capacidade de atenuação das radiações ionizantes e qualidade de seus

produtos e que as pesquisas não possuem viés nos seus resultados técnicos. Para comprovar os resultados dos dados fornecidos pelos fabricantes seriam necessários a obtenção das vestimentas estudadas e a realização de ensaios padronizados em laboratório, o que está além do escopo deste trabalho.

3.1.1 VPRS SELECIONADAS PARA O ESTUDO

A seguir serão resumidamente descritas, agrupadas por fabricante, as principais vestimentas de proteção radiológica selecionadas no estudo.

3.1.1.1 RADIATION SHIELD TECHNOLOGIES (RST)

O fabricante *Radiation Shield Technology* desenvolveu uma roupa de proteção à radiação usando a patente DEMRON, que é um composto à prova de água e à prova de gases, feito de polímeros de polietileno e cloreto de polivinila, juntamente com sais inorgânicos de metais pesados (exceto chumbo) dispersos em matriz polimérica. Este polímero composto é laminado entre camadas de tecido têxtil usado na fabricação dos coletes e vestimentas de corpo inteiro. Eles desenvolveram coletes com 1, 2 e 4 camadas de DEMRON que pesam 2,54, 2,57 e 4,3 kg, respectivamente. Nas vestimentas DEMRON de corpo inteiro classe 1 e classe 2 vem com capuz integrado e sem bainha facial, bainhas elásticas integradas e capas de sapato que pesam 5,2 e 4,8 kg, respectivamente [26].

O material possui proteção radiológica semelhante à blindagem de chumbo, ao mesmo tempo em que é leve e flexível. A composição do DEMRON é descrita como um polímero não tóxico. O colete DEMRON protege o usuário da radiação ionizante e pode ser usado em conjunto a outras capas de proteção contra ameaças químicas e biológicas. DEMRON é cerca de três a quatro vezes mais caro do que um avental de chumbo convencional, mas pode ser tratado como um tecido normal para limpeza, armazenamento e descarte. Os usos mais recentes do DEMRON incluem trajes de primeiros socorros certificados, bem como coletes táticos. Seu uso foi comprovado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para reduzir significativamente a radiação alfa e beta de energia elevada e reduzir a radiação gama de energia pequena. Quando várias folhas de DEMRON são laminadas juntas, o resultado é um escudo muito mais poderoso, embora não consiga bloquear completamente toda a radiação gama.

O fabricante RST solicitou ao *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), do departamento de Energia dos Estados Unidos da América, a medição de transmissão de radiação para o tecido DEMRON, a fim de determinar as propriedades de blindagem nas emissões de radiação X, gama e partículas beta na faixa de energias relevantes para aplicações clínicas e de segurança interna. Neste relatório [27], o conceito de dureza espectral "*spectral hardening*" foi investigado medindo os fatores de transmissão para muitas camadas e extraindo informações das inclinações das curvas de transmissão, obtendo assim uma imagem real das propriedades de blindagem do material em função da energia. Foram calculados os coeficientes de atenuação de massa usando os dados de seção transversal do LLNL, o código TART (que é usado para simulação Monte Carlo do transporte acoplado de nêutrons-fótons em geometria 3D para blindagem entre outras aplicações), as frações de peso fornecidas pelo RST e a densidade medida do tecido.

Ainda de acordo com Friedman & Singh [27], foi apresentado que com essa ferramenta de projeto, é possível "ajustar" as características do tecido DEMRON, para atender às necessidades específicas de um determinado ambiente de radiação, facilitando assim o projeto de um tecido para atender determinadas especificidades de proteção radiológica.

A título de comparação, os gráficos produzidos no relatório [27] serão aqui apresentados para observação direta da atenuação da radiação em função da densidade da superfície, expressa em g/cm^2 , para as emissões gama de baixa, moderada e alta intensidades.

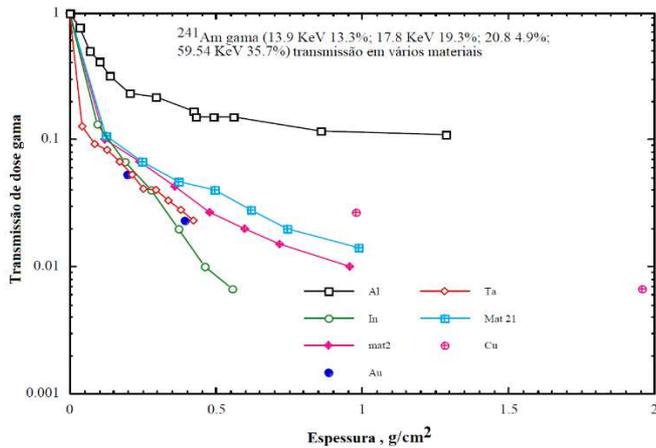


Figura 6 – Transmissão de dose de radiação do ²⁴¹Am em diferentes materiais [27].

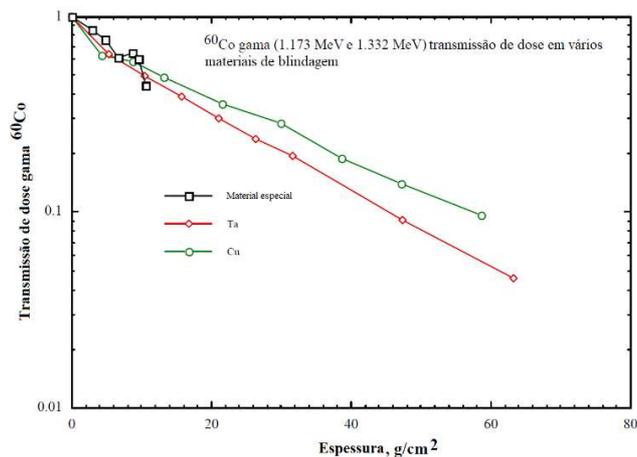


Figura 9 – Transmissão de radiação gama do ⁶⁰Co no material especial, Tântalo (Ta) e Cobre (Cu) [27].

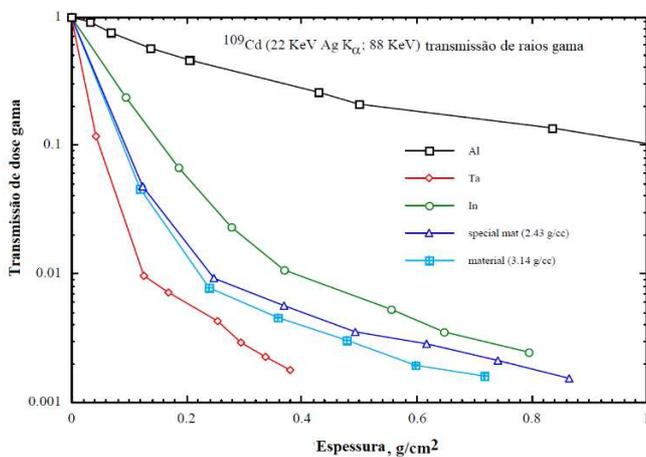


Figura 7 – Transmissão de radiação gama do ¹⁰⁹Cd em diferentes materiais [27].

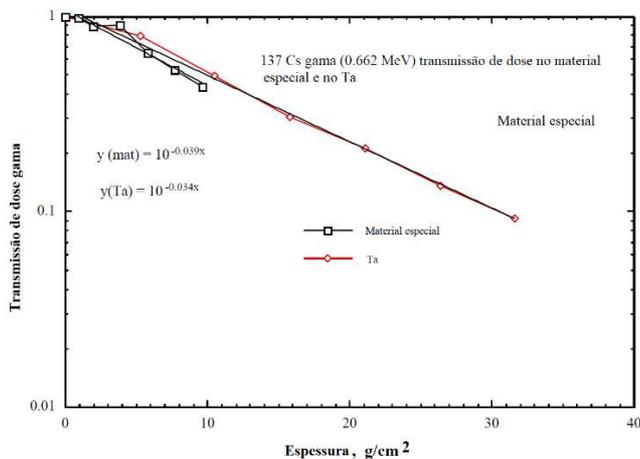


Figura 8 – Transmissão de radiação gama pelo ¹³⁷Cs no material especial e no Tântalo (Ta) [27].

Por fim, as principais conclusões pontadas por Friedman & Singh [27] a respeito do material DEMRON, foram as seguintes:

- DEMRON é eficaz como blindagem de radiação, comparável com o chumbo e o Tântalo em termos de g/cm^2 de acordo com o coeficiente de atenuação de massa, contra emissões gama, raios-X e beta;
- As características físicas do DEMRON como um tecido maleável e flexível tornam-no muito mais fácil de trabalhar e manusear do que o chumbo;
- DEMRON é frio ao toque;
- Ao contrário do chumbo, de acordo com a RST, o DEMRON não é tóxico, não contém riscos dérmicos ou de inalação para o usuário e não requer condições restritivas especiais de descarte;
- A espessura da amostra fornecida (0,38 mm), DEMRON fornece um fator 3 para proteção à radiação beta e um fator 10 contra emissões pequenas de energia gama;
- Os coeficientes de atenuação de massa podem ser usados para determinar a espessura do tecido DEMRON necessária para proteger com sucesso contra a radiação gama de energia/intensidade maior.

Uma descrição sumária dos produtos da *Radiation Shield Technologies* (RST) está disponível em seu sítio na internet <<https://radshield.com/demron/>> [28]. O catálogo de produtos RST foi adicionado ao ANEXO A.

3.1.1.1.1 Modelo: DEMRON™ W CBRN ENSEMBLE

País de origem: Estados Unidos/US.

Preço disponível no sítio na internet: de \$3.199,00 a \$3.399,00 USD (variando de acordo com o tamanho).

De acordo com a descrição do produto no catálogo do fabricante, o traje de proteção RST DEMRON™ W CBRN ENSEMBLE foi projetado para fornecer proteção total contra ameaças CBRN (*Chemical, Biological, Radiological, Nuclear*). DEMRON reduz o estresse por calor, permitindo uma melhor dissipação de calor do que qualquer outro impermeabilizante. De acordo com o Laboratório de Defesa Nacional Lawrence Livermore, o traje é um excelente escudo de partículas beta de energia elevada e fornece pelo menos 50% de proteção à raios gama de até 130 keV. Na Figura 10 têm-se uma foto desse modelo de vestimenta.



Figura 10 – Modelo DEMRON™ W CBRN Ensemble.

Na Tabela 3 a seguir, tem-se os principais atributos de proteção à radiação ionizante fornecidos pelo fabricante para os três modelos da RST em análise (#01, #02 e #03).

Tabela 3 – DEMRON™ W CBRN ENSEMBLE.

Fonte	Tipo	Energias	Redução de dose (%)
²⁴¹ Am	Gama(γ)	4,9% 20,8 Kev 13,3% 13,9 Kev 19,3% 17,8 Kev 35,7% 59,54 Kev	$\geq 85\%$
¹⁰⁹ Cd	Gama(γ)	22 Kev Maior 88 Kev Menor	$\geq 91\%$
¹³⁷ Cs	Gama(γ)	0,662 Mev	$\sim 1\%$
⁶⁰ Co	Gama(γ)	1,173 Mev 1,332 Mev	$\leq 1\%$
⁹⁰ Sr	Beta (β)	546 Kev	75%
⁹⁰ Y	Beta (β)	2,27 Mev	75%

3.1.1.1.2 Modelo: DEMRON™ FULL BODY SUIT

País de origem: Estados Unidos/US.

Preço disponível no sítio na internet: de \$1.999,00 a \$2.099,00 USD (variando de acordo com o tamanho).

De acordo com a descrição do produto no catálogo do fabricante, o traje de proteção RST DEMRON™ FULL BODY SUIT foi projetado para fornecer proteção, principalmente, contra ameaça radiológica e nuclear. Também este modelo de vestimenta fornece resistência adicional contra ameaças químicas e biológicas, além de permitir uma melhor dissipação de calor do que qualquer outro impermeabilizante. De acordo com o Laboratório de Defesa Nacional Lawrence Livermore, o traje é um excelente escudo de partículas beta de energia elevada e fornece pelo menos 50% de proteção à raios gama de até 130 keV. Na Figura 11 têm se uma foto deste modelo de vestimenta.



Figura 11 – Modelo DEMRON™ FULL BODY SUIT.

3.1.1.1.3 Modelo: DEMRON™ RADIATION TORSO VEST (1-PLY, 2-PLY, 4-PLY)

País de origem: Estados Unidos da América.

Preço 1-Ply disponível no sítio na internet: \$699,00 USD.

Preço 2-Ply disponível no sítio na internet: \$1.199,00 USD.

Preço 4-Ply obtido após consulta ao fabricante: \$2.100,00 USD.

De acordo com a descrição do produto no catálogo do fabricante, o traje de proteção RST DEMRON™ RADIATION TORSO VEST foi projetado para fornecer proteção, principalmente à radiação ionizante. Esse modelo é tamanho único e ajustável conforme porte do usuário.

O colete de radiação Demron fornece redução de gama pura e auto resfriamento para o primeiro combate em um evento radiológico. O colete pode ser utilizado em conjunto com

outro traje para complementar a proteção CBRN. Na Figura 12 têm-se duas fotos desse modelo.



Figura 12 – Modelo DEMRON™ RADIATION TORSO VEST.

3.1.1.2 GUANGZHOU HEKANG BIOTECHNOLOGY COMPANY

Uma outra vestimenta de proteção radiológica é a HKX 1558, com proteção de corpo inteiro da Guangzhou Hekang Biotechnology Co. Ltd., China. equipado com protetores de sapato de proteção destacáveis, um capuz integrado sem uma faixa facial e punhos de manga elástica integrados foi feita por laminação de uma folha de polímero de vinil disperso com compostos de chumbo entre tecidos, capazes de blindar pequenos valores de radiação e pesa em torno de 10,10 kg [26].

3.1.1.2.1 Modelo: HKX 1558 FULL BODY SUIT

País de origem: China.

Preço disponível obtido após consulta ao fabricante: \$950,00 USD.

A Vestimenta HKX 1558 possui capas de proteção destacáveis para sapatos, capuz integrado sem uma faixa para o rosto, punhos de manga com elásticos integrados.



Figura 13 – Modelo HKX 1558 Full Body Suit.

3.1.1.3 ALPHA TECHNICAL RESEARCH COMPANY

Uma empresa Japonesa chamada Alpha Technical Research desenvolveu um colete protetor flexível livre de chumbo com tecnologia de folha Df.

Tabela 4 – Principais características da folha Df tipo W.

Principais características	Folhas Df Tipo W
<p>Dimensões externas padrão:</p> <p>Largura 300 mm × comprimento 1000 mm</p> <p>Espessura: 0,63 mm a 3,5 mm</p> <p>Densidade específica: 8,0 a 11,5 kg/m³</p>	

3.1.1.3.1 Modelo: Df vest 2mm

País de origem: Japão.

Preço obtido após consulta ao fabricante: \$2750,00 USD.

De acordo com o fabricante este produto é indicado para uso como equipamento de proteção em instalações nucleares. Sua composição é basicamente de tungstênio disperso na matriz de resina. Este polímero composto é laminado para produzir as folhas Df tipo W. A empresa também desenvolve outros tecidos de Df tipo F e Df tipo T para aplicações de proteção à radiação X de trabalhadores e instalações médicas. A vestimenta é composta de duas partes: uma para proteção superior e uma para as partes inferiores, cada uma delas pesando aproximadamente 9 kg.

Descrição sumária dos produtos da Alpha Technical Research Company disponível no em seu sítio na internet <<https://www.alpha-tr.co.jp/global/df.html>>.



Figura 14 – Modelo Df vest 2mm.

3.1.1.4 YAMAMOTO CORPORATION

A YAMAMOTO possui experiência com roupas de proteção de raios X há mais de dez anos. Após o acidente nuclear de Fukushima foi necessário aplicar esta tecnologia, e com grande urgência, para desenvolver o material BIORUBBER RSM, de proteção à radiação ionizante, a fim de diminuir a exposição à radiação dos trabalhadores do acidente nuclear, causado pelo grande terremoto do leste do Japão em 11 de março de 2011.

Como resultado do trabalho realizado pelo Atomic Energy Research Institute [29], da universidade Kinki, bem como por pesquisadores da YAMAMOTO CORPORATION, afirmaram terem desenvolvido uma vestimenta com proteção aos raios gama que reduzem a dose nos trabalhadores e não reduz a eficiência do trabalho.

A folha de proteção à radiação, BIORUBBER RSM, possui alta flexibilidade devido sua borracha sintética especial que possui uma estrutura de bolhas de ar independentes. A folha possui uma estrutura multicamadas onde é laminada a borracha leve e a borracha com proteção à radiação. Já a superfície é tratada com uma tecnologia especial de tratamento de superfície chamada "TX". Mesmo que o material radioativo se fixe na superfície do material, ele pode facilmente removê-lo com água. Segundo informações do fabricante, as vestimentas de proteção radiológica feitas com este material têm registros comprovados de uso por empresas para lidar com acidentes em usinas nucleares e têm uma reputação estabelecida entre os clientes. Na Figura 15 tem-se uma demonstração das camadas que compõem o tecido BIORUBBER RSM E-400 4 mm.

Segundo o fabricante, a eficácia desta tecnologia à radiação eletromagnética linear (raios-X e raios gama), é que quando as ondas passam pelo material são difundidas e refletidas pela estrutura, atenuando a quantidade de movimento da radiação e tornando possível limitar o conteúdo de metal pesado ao nível mínimo. Isso permitiu a YAMAMOTO tornar o material leve em comparação com os materiais anteriores de proteção à radiação.

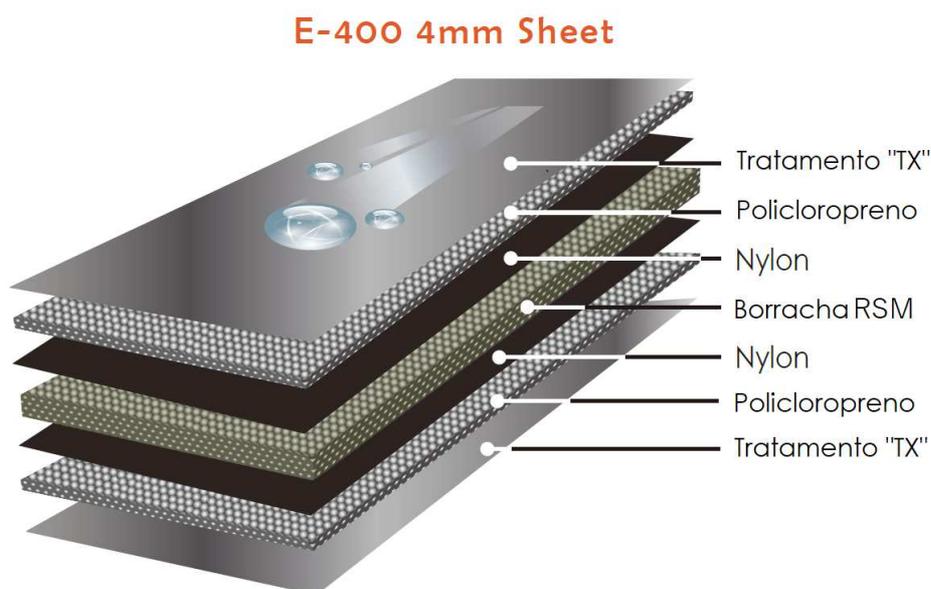


Figura 15 – Composição das camadas do material BIORUBBER RSM.

Os seguintes efeitos de blindagem foram confirmados pelo Atomic Energy Research Institute, da universidade Kinki, nas seguintes amostras de borrachas BIORUBBER RSM: E-300 (4mm), E-400 (4mm), E-600 (3mm), E-600 (6mm). Os efeitos de proteção medidos na instalação de teste são indicados na Tabela 5 abaixo a seguir, dados disponíveis no site sítio do fabricante [30]. Para maiores detalhes dos testes realizados e dos resultados obtidos ver conteúdo “BIORUBBER RSM” Proposal, no ANEXO B. Seguem os resultados dos dois primeiros testes realizados nas amostras. Em ambos os testes foi utilizado o dosímetro TCS-161 (Aloka) e a fonte de radiação foi ^{137}Cs , com atividade de 1,8 MBq.

Taxa de blindagem RSM de raios gama de ^{137}Cs : teste-1 (ANEXO B).

Método de teste: Intervalo de detecção do dosímetro e fonte de radiação definido em 50 mm e teste conduzido inserindo cada sujeito de teste 50 mm no detector.

Tabela 5 – Resultado da taxa de blindagem BIORUBBER RSM - teste 1 (ANEXO B).

	Fonte de raio apenas	E-400 4mm	E-600 3mm	E-600 6mm
Dose Máxima ($\mu\text{Sv} / \text{h}$)	48.5	46.1	43.1	35.8
Dose média ($\mu\text{Sv} / \text{h}$)	48.1	46.0	43.0	35.7
Razão de Blindagem (%)		4.4	10.5	25.7

Taxa de blindagem RSM de raios gama de ¹³⁷Cs: teste-2 (ANEXO B).

Método de teste: Intervalo de detecção de dosímetro e fonte de radiação definido em 300 mm e teste conduzido inserindo cada sujeito de teste no detector.

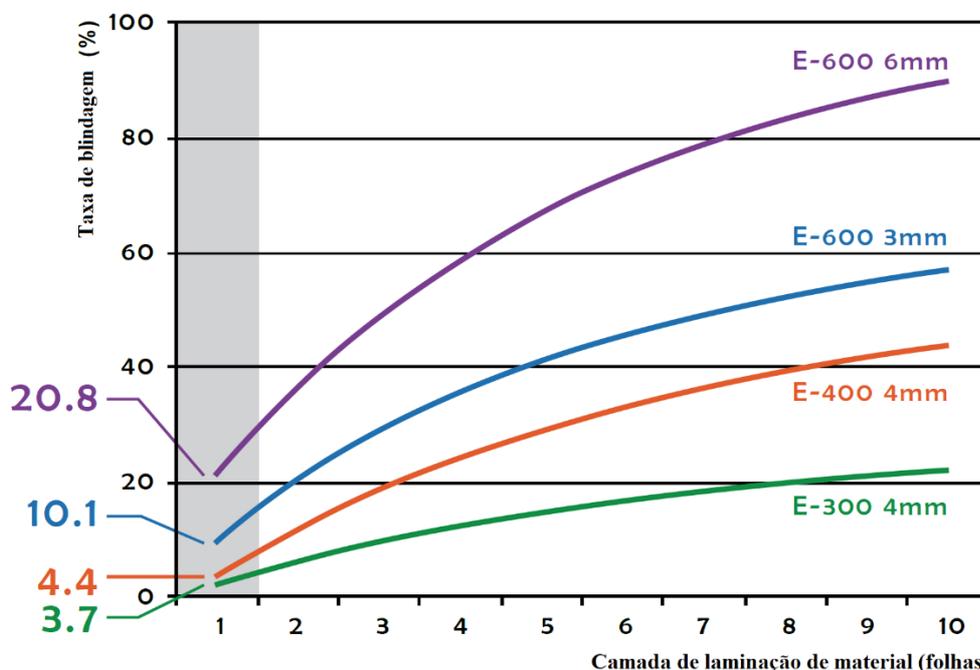


Figura 16 – Taxa de blindagem do BIORUBBER RSM em raios gama de ¹³⁷Cs: teste-2. ANEXO B.

Tabela 6 – Quadro dos percentuais de atenuação para cada tipo de radiação em diferentes materiais BIORRUBBER RSM (disponível no sítio do fabricante)[30].

	Raio gama (Césio 137 apenas)	Raio X
E-600 6mm	Approx. 25.7%	Approx. 99.9%
E-600 3mm	Approx. 10.5%	Approx. 98.6%
E-400 4mm	Approx. 4.4%	Approx. 92.2%
E-300 4mm	Approx. 3.7%	Approx. 90.6%

É claramente perceptível que o material da série E-600 possui os melhores resultados de proteção à radiação ionizante. Contudo, em contato com fabricante para consulta dos preços, foi informado que essa série havia sido descontinuada. Após ser solicitado mais detalhes sobre o motivo pelo qual a série havia sido descontinuada, o fabricante informou que a vestimenta confeccionada era extremamente pesada sendo de difícil locomoção, pouco ajuste e maleabilidade no corpo durante o uso. Além disso a demanda era extremamente pequena e que atualmente não seria possível sua produção.

Conforme é apresentado no site do fabricante YAMAMOTO Corporation, três modelos de vestimentas são apresentados como produtos para proteção à radiação ionizante: são eles:

- E-400 Vest Type XI;
- E-400 Vest Type XIII; e
- E-400 Type YS.

Durante a consulta ao fabricante sobre o preço de cada um dos respectivos modelos, foi informado que o modelo E-400 Vest Type XIII também havia sido descontinuado pelas mesmas razões apresentadas para a série E-600. Já o modelo E-400 Type YS, conforme informado pelo representante da YAMAMOTO Corporation, é exclusivo da empresa comercial YOTSUGI, e que atualmente encontrava-se praticamente esgotado em virtude da mudança do responsável pela outra empresa. Portanto, para fins de seleção das vestimentas, restou somente as vestimentas da série E-400 para o modelo XI, fabricado e fornecido pela YAMAMOTO, para participar da análise comparativa das VPRs.

Em seguida será apresentada uma descrição sumária dos produtos da YAMAMOTO Corporation disponível no sítio na internet <https://www.yamamoto-bio.com/yamamoto_e/rsm/index.html> [30]. Um folheto de descrição do modelo E-400 Vest Type XI BIORUBBER RSM pode ser observado no ANEXO B.

3.1.1.4.1 Modelo: BIORUBBER RSM Tipo XI – E-400 (Colete + Protetor inferior)

País de origem: Japão.

BIORUBBER RSM Tipo XI - E-400: Preço após consulta ao fabricante: \$2.540,34 USD.

Tamanhos: L, LL 3L e 4L.

Com base no BIORUBBER E-400 Wear Type VII, com um extenso histórico de uso em áreas contaminadas radioativamente, as mudanças foram feitas para melhorar a mobilidade para o trabalho e menos peso (aproximadamente 1kg mais leve). A característica mais notável deste produto é que o enxágue tornou-se possível ao contrário dos produtos convencionais em virtude da aplicação de um tratamento de superfície especial que também é usado para materiais de banho de velocidade grande de YAMAMOTO. Além disso, como o protetor

inferior pode ser acoplado diretamente ao colete, é recomendado para trabalhadores que desejam uma fácil movimentação das pernas.



Figura 17 – Modelo BIORUBBER Tipo XI – E400 4mm.

3.1.1.5 STEMRAD

A STEMRAD desenvolveu recentemente um novo traje para proteção à radiação gama, que focaliza a proteção em torno da região pélvica envolvendo toda a área da medula óssea e a região abdominal. Segundo informação existente no sítio do fabricante na internet, até o advento do StemRad 360 Gamma, um dos principais produtos da empresa, não havia proteção significativa à radiação gama disponível no mercado.

De acordo com WATERMAN et al. [31], do departamento de pesquisa e desenvolvimento da STEMRAD, pesquisadores afirmaram terem desenvolvido um dispositivo de proteção à radiação ionizante capaz de garantir a sobrevivência de um volume crítico de

medula óssea ativa, e como tal, pode oferecer melhorias dramáticas na capacidade de sobrevivência em cenários radiológicos extremos. Este dispositivo também é eficaz na redução das doses absorvidas acumuladas na medula, ovário e cólon ao longo da vida do IOE, se usado durante a execução de tarefas com exposições gama potencialmente anormais. Deste modo pode ser usado para proteger profissionais em uma variedade de ocupações, desde radiografia gama e esterilização agrícola até o descarte de material explosivo radiológico.

Segundo informação disponível no sítio do fabricante, a solução de proteção à radiação da STEMRAD é aproveitar a capacidade regenerativa das células-tronco para permitir que o corpo se recupere após a exposição. Isso é conseguido protegendo-se de forma seletiva e eficaz a medula óssea e outros órgãos ricos em células-tronco nas regiões abdominal e pélvica, como ovários, cólon e bexiga [32].

Ainda de acordo com WATERMAN et al. [31], esta focalização na proteção de uma determinada área do corpo humano levou a um dispositivo de proteção seletiva à radiação semelhante a um cinto com espessura variável, usando apenas a quantidade mínima de material de proteção necessária. Este dispositivo de proteção seletiva em combinação com o tecido do corpo é configurado para fornecer uma atenuação de radiação total substancialmente uniforme de até quatro vezes para o ^{137}Cs em 300 cm^3 de medula óssea ativa no quadril posterior (pelve) e graus menores de proteção adicional para a região lateral e frontal do quadril. O material do dispositivo de blindagem seletiva é fornecido na forma de múltiplas folhas de chumbo virgem com espessura de 1 mm, escolhidas por sua eficiência de massa na blindagem de radiação gama, que são colocadas umas sobre as outras formando um dispositivo de proteção de uma topografia inversamente relacionada à espessura e densidade do tecido presente entre o dispositivo de proteção seletiva e a medula óssea ativa protegida pela crista ilíaca.

Os resultados obtidos por WATERMAN et al. [31], comprovam que a vestimenta STEMRAD é realmente eficaz na atenuação para radiação gama, com regiões de máxima atenuação de aproximadamente 58%, porém obtendo uma média 41% de atenuação da radiação ionizante para o Césio 137. Para comparar com as outras vestimentas, será considerado o valor médio de atenuação.

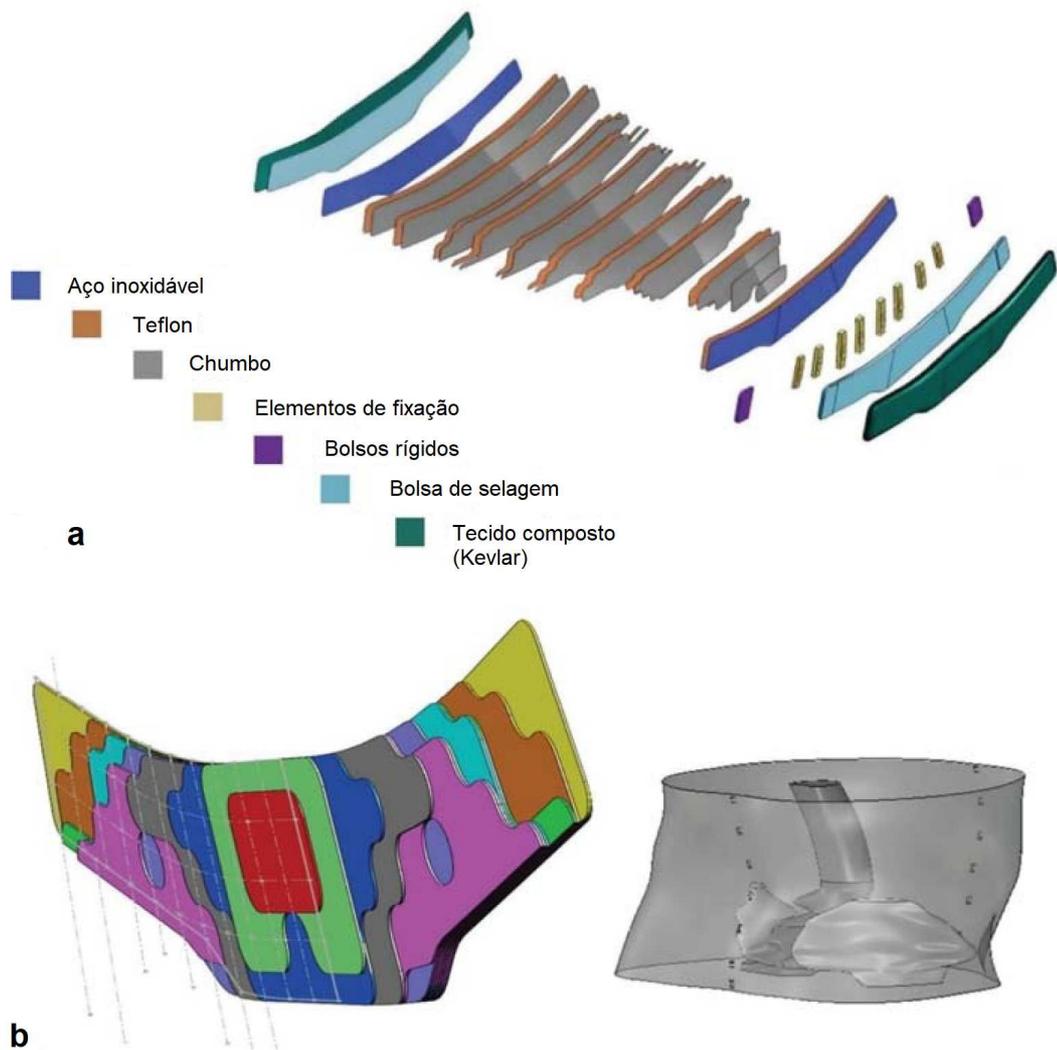


Figura 18 – Detalhe do projeto do dispositivo de blindagem STEMRAD 360 V. a. O componente de atenuação de radiação do dispositivo de blindagem é composto por várias folhas de chumbo virgem de 1 mm de formato exclusivo com divisórias de minimização de atrito colocadas entre elas e vários outros elementos estruturais para manter a flexibilidade e durabilidade. b. A topografia do componente de atenuação corresponde à anatomia do BM subjacente, de modo que é de uma espessura inversamente relacionada à espessura e à densidade do tecido presente entre o dispositivo e a medula óssea, minimizando assim o peso sem comprometer a proteção [31].

Como cada folha de chumbo da camada de blindagem possui um formato exclusivo, o dispositivo foi projetado para garantir máxima proteção na região do quadril posterior, devido a sobreposição das várias camadas de chumbo virgem, sendo a região de maior equivalência de chumbo e atenuação de radiação linear. A Figura 19 a seguir mostra a variação da espessura do material de proteção em termos de equivalência de chumbo, junto com a redução da intensidade de radiação fornecida por cada valor de espessura em termos de radiação de uma fonte linear de ^{137}Cs .

										
Chumbo equivalente	3mm	4mm	5mm	6mm	7mm	8mm	9mm	10mm	11mm	12mm
Atenuação de Cs-137	27%	32%	34%	42%	50%	56%	62%	66%	70%	73%



Figura 19 – Chumbo equivalente e atenuação da radiação no dispositivo de blindagem StemRad [32].

Segundo informações no site do fabricante STEMRAD, dois modelos do dispositivo de proteção à radiação ionizante poderiam servir para proteção dos profissionais de manutenção de plantas nucleares, são eles:

- STEMRAD 360^y (pessoal civil); e
- STEMRAD 360^y (Equipe do Reator).

Em resposta à consulta realizada, os dois tipos do STEMRAD 360^y mencionados, não são modelos diferentes, mas o mesmo equipamento pode ter aplicações diferentes. Pois esse equipamento de proteção à radiação está disponível para aquisição por civis, bem como por empregadores de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs) que trabalham com manutenção de uma planta nuclear. Segundo o fabricante, estes trajes poderiam ajudar para a abordagem deste trabalho pois são realmente ergonômicos permitindo total mobilidade, protegendo ao mesmo tempo as regiões mais vitais.

Os folhetos de descrição do produto STEMRAD 360^y para aplicações civis e para equipe do reator, estão disponíveis no sítio na internet <<https://stemrad.com/>> [32]. Os folhetos de descrição desta vestimenta estão disponíveis no ANEXO C.

3.1.1.5.1 Modelo: STEMRAD 360^v

País de origem: Estados Unidos/US.

Preço obtido após consulta ao fabricante: \$6.000,00 USD. Após consulta ao fornecedor, foi informado que o poderia oferecer um preço melhor para uma maior quantidade.

De acordo com descrição do fabricante, o STEMRAD 360 é o primeiro escudo vestível do mundo que oferece proteção significativa à radiação gama. A compatibilidade total da blindagem existente com o modelo otimizado fornece ao usuário a mobilidade necessária para realizar tarefas críticas em caso de um incidente nuclear.

Por ter sido projetado para promover uma proteção seletiva e eficaz da região do quadril, não possuindo proteção às partículas alfa, beta, entre outros contaminantes radioativos presentes na superfície e na atmosfera do compartimento do reator, sendo necessário, portanto, a utilização em conjunto com outro vestuário de proteção nuclear.



Figura 20 – Modelo STEMRAD 360^v [31].

3.2 ESTUDO COMPARATIVO DAS VPRS EXISTENTES

Pelos mesmos motivos retratados em [7] e [8], como exemplo, problemas ergonômicos, desconforto com o peso e a temperatura das vestimentas e pela dificuldade de usar os aventais de chumbo padrão, estes foram eliminados da análise comparativa. Outro motivo que culminou na eliminação dos aventais de chumbo padrão foi o da especificidade da aplicação, pois essa vestimenta foi desenvolvida para emprego, principalmente, em radiologia

médica, não sendo compatíveis com as exigências das atividades de manutenção, e por terem sido encontrados vários modelos disponíveis, de diferentes fabricantes, e que atendem mais especificamente aos critérios de uso para manutenção de usinas nucleares.

A vestimenta selecionada como caso básico foi o modelo ProTech Plus da UNITECH, que segundo o fabricante mais de 50% dos reatores nucleares do mundo usam suas roupas de proteção, fornecendo também para estaleiros navais, instalações D.O.E. nos Estados Unidos (*U.S. Department Of Energy*), fabricantes de combustível, entre outros. Sendo uma marca de roupas de proteção à radiação estabelecida e mundialmente conhecida atendendo a indústria nuclear desde 1957 [33]. Ainda que as vestimentas do fabricante UNITECH não possuam nenhuma proteção à radiação X e gama, possuem proteção especialmente à radiação alfa e beta, além de ser de fácil descontaminação, confortável, fácil de vestir e lavável.

Além disso, as vestimentas de proteção local à radiação gama, apresentadas na Tabela 8, em geral, não possuem uma completa defesa de toda a superfície do corpo, deixando os membros superiores e inferiores expostos à radiação alfa e beta. Portanto, a utilização de uma VPR em ambientes confinados estará vinculada ao uso complementar de uma vestimenta de proteção superficial, ou dérmica, como a selecionada para o caso básico, assim proporcionando uma proteção integral a todos os perigos da radiação ionizante.

Em trabalhos recentes publicados por KOZLOVSKA et al. [34] e [35], foram comparadas diferentes vestimentas com foco no aspecto de proteção radiológica. Aproveitando-se dos resultados do trabalho comparativo realizado em ambos os artigos, serão acrescentadas outras características para serem comparadas, a fim de apontar, no final da análise, quais são as três melhores vestimentas disponíveis no mercado e qual se sobressai como a melhor VPR. Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros gerais de comparação das VPRs de corpo inteiro, e na Tabela 8 são apresentadas as VPRs de proteção local (região do torso), respectivamente.

Tabela 7 – Quadro comparativo dos principais parâmetros das vestimentas de corpo inteiro.

Nome	DEMRON Full Body Suit [34]	DEMRON Class 2 Full Body Suit [34]	HKX 1558 Whole Body Anti-Radiation Wear [34]	ProTech Plus [33]
Descrição	Uma vestimenta com capuz integrado sem bainha para o rosto, punhos de manga elástica integrados e capas de sapatos	Uma vestimenta da classe NFPA 1994/2007, com capuz integrado com um punho facial, luvas integradas e meias de material DEMRON	Uma vestimenta com capas de proteção destacáveis para sapatos, um capuz integrado sem uma faixa para o rosto, punhos de manga elásticos integrados	Caso básico
Fabricante	Radiation Shield Technology	Radiation Shield Technology	Guangzhou Hekang Biotechnology Co. Ltd.	UNITECH
País	Estados Unidos	Estados Unidos	China	Estados Unidos
Material de blindagem	DEMRON [1]	DEMRON [1]	Compostos de chumbo, dispersos em vinil	Não possui
Chumbo equivalente (mm)	Não fornecido	Não fornecido	0,25	-
Peso (kg)	5,20	4,8 (sem luvas e meias)	10,10	-
Espessura da camada de blindagem (mm)	0,92	0,80	0,66	-
Densidade superficial (g cm⁻²)	0,13	0,13	0,40	-
Custo (\$USD)	1.999,00	3.199,00	950,00	50
Atenuação da radiação ionizante ¹³⁷Cs (%)	1	1	4	-

[1] DEMRON é um polímero compósito impermeável a água e gás de PE, PVC e sais inorgânicos de elementos de alto número atômico (excluindo chumbo), é laminado entre camadas têxteis.

Tabela 8 – Quadro comparativo dos principais parâmetros das vestimentas de proteção local.

Nome	DEMRON Radiation Torso Vest 1Ply [34]	DEMRON Radiation Torso Vest 2Ply [34]	DEMRON Radiation Torso Vest 4Ply [34]	Df Vest (W-2 mm) [34]	BIORUBBER RSM Tipo XI E-400 4mm (Vest + Pants) [34]	STEMRAD 360°[31]
Descrição	Um colete com proteção integrada para gônadas, proteção removível da tireoide	Um colete com proteção integrada para gônadas, proteção removível da tireoide	Um colete com proteção integrada para gônadas, proteção removível da tireoide	Um colete e uma parte inferior de 6 peças, camadas de proteção destacáveis	Um colete e calças e com uma superfície especial anti-adesiva BRS	Cinto com alças ajustáveis e núcleo de proteção formado por folhas de chumbo, aço e teflon envoltos em tecido Kevlar
Fabricante	Radiation Shield Technology	Radiation Shield Technology	Radiation Shield Technology	Alpha Technical Research Co. Ltd.	YAMAMOTO Corporation	STEMRAD
País	Estados Unidos	Estados Unidos	Estados Unidos	Japão	Japão	Estados Unidos
Material de blindagem	DEMRON [1] 1 folha	DEMRON [1] 2 folhas	DEMRON [1] 4 folhas	Tungstênio disperso em resina	BIORUBBER[2] E-400	STEMRAD [3]
Chumbo equivalente (mm)	Não fornecido	Não fornecido	Não fornecido	⁶⁰ Co: 2.0 mm	¹³⁷ Cs: 4,4%	De 3 a 12mm de acordo com a posição
Peso (kg)	2,54	2,57	4,30	Vest: 9,00 Bottom: 9,00 Total: 18	Vest: 4,90 Pants: 9,00 Total: 13,9	14
Espessura da camada de blindagem (mm)	1,63	1,60	2,77	2,31	1,63	-
Densidade superficial (g cm⁻²)	0,32	0,26	0,47	2,08	0,72	-
Custo (\$USD)	699,00	1.199,00	2.100,00	2.750,00	2.540,34	6.000,00
Atenuação da radiação ionizante ¹³⁷Cs (%)	2	3	5	16	6	41

[1] DEMRON é um polímero compósito impermeável a água e gás de PE, PVC e sais inorgânicos de elementos de alto número atômico (excluindo chumbo), é laminado entre camadas têxteis.

[2] BIORUBBER consiste em ligas de metais pesados (principalmente chumbo) dispersas em material sintético com estrutura de células em favo de mel regular, sendo laminado em camadas especiais à radiação e borracha leve anti-adesivas com tratamento TX.

[3] STEMRAD: veste com arquitetura de blindagem seletiva e de espessura variável, que otimiza a proteção. Materiais primários do núcleo de proteção: chumbo virgem, aço inoxidável e teflon, envoltos em um tecido de Kevlar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os atributos selecionados para comparação das vestimentas foram os seguintes:

- Custo de proteção - X;
- Atenuação de radiação ionizante (percentual de atenuação) - A;
- Peso - P;
- Conforto - C;
- Descontaminação superficial - D;

O primeiro parâmetro de comparação e, um dos mais importantes, é o custo de proteção da vestimenta de proteção radiológica. Pois permitirá relacionar as importâncias de cada atributo com o custo de proteção em ambas as técnicas selecionadas para seleção das vestimentas. Assim, contribuindo para atendimento do princípio *ALARA* da proteção radiológica, verificando a razoabilidade econômica e social para a seleção das VPRs.

Para comparar a atenuação da radiação ionizante entre as vestimentas foram selecionados os valores de atenuação relativo ao radionuclídeo ^{137}Cs – Césio 137 – (que é emissor gama de pequena energia com 0,66MeV em 94,6% das desintegrações) pois todas as vestimentas sob análise possuem os resultados experimentais para esse radionuclídeo. Em virtude das vestimentas se tornarem menos eficazes em energias maiores, devido ao efeito Compton se tornar menor e começar a produção de pares em 1,02 MeV. Isto possibilita um estudo mais detalhado das vestimentas para a atenuação de outros radionuclídeos, com energias maiores, como por exemplo para o ^{60}Co – Cobalto 60 – que é uma das energias mais prevalentes do que aquela do Césio 137 em reatores nucleares.

A partir da comparação do peso das vestimentas, é possível observar aquelas que poderiam necessitar de um menor esforço físico pela utilização da VPR, consequentemente, suscitando menos problemas ergonômicos, fadiga e lesões osteomusculares pelo peso, provocado nos trabalhadores.

Para análise do atributo qualitativo de conforto das vestimentas foram verificadas as informações disponibilizadas pelos fabricantes. Com relação ao atributo conforto da vestimenta, como não foi possível adquirir as vestimentas para realizar uma pesquisa em loco

com profissionais de manutenção, para averiguação desse atributo, os valores atribuídos para as prioridades parciais foram determinados a partir da importância que cada fabricante dedicou para apresentar essa característica em seu produto.

E para analisar o atributo descontaminação superficial, foi levado em conta se a vestimenta possui algum tratamento superficial que possibilite a descontaminação superficial e se a vestimenta é de corpo inteiro ou de proteção local. Nas vestimentas de proteção local faz-se necessário a utilização de uma vestimenta suplementar de proteção dérmica, contra radiação de partículas alfa e beta, para proteger a cabeça, membros superiores e inferiores que ficam descobertos.

As duas técnicas que serão aplicadas para a seleção das vestimentas, ou seja, a análise de prioridades com atributos múltiplos e a análise com critérios múltiplos excedentes, podem usar atributos mensuráveis como qualitativos e em qualquer quantidade. Como é subjetiva a definição do valor e da importância dos atributos, dependendo dos critérios que serão adotados pelo tomador de decisão, a opção ótima passa a depender da escolha dos valores e da importância dada aos atributos, e, portanto, podem ser escolhidas para fornecerem o resultado desejado pelo executor da análise. Para a seleção de uma vestimenta para manutenção de Planta Nuclear Móvel (PNM), projeto inédito no Brasil, para um ambiente hostil, confinado e limitado, no qual ainda existem muitas incógnitas quanto a taxa de dose de radiação da planta nuclear quando desligada para realização de inspeção, manutenção e reparo no compartimento do reator, foi adotado com o maior valor da importância o atributo de atenuação da radiação ionizante da vestimenta. Sendo seguido pelo atributo de conforto da vestimenta, tendo como princípio a necessidade de atender aos requisitos de ergonomia para realização de diferentes atividades relativas a manutenção dentro de um espaço limitado.

Para facilitar a identificação das vestimentas sob análise foram sombreadas na cor azul as vestimentas de proteção local e em verde as vestimentas proteção de corpo inteiro. Na Tabela 9 estão apresentadas as vestimentas sob análise e as principais características para análise.

Foram consideradas 10 opções considerando o caso base (vestimenta exemplo ProTech Plus da empresa UNITECH, nenhuma proteção).

Tabela 9 – Quadro comparativo dos principais atributos das opções proteção (VPR).

Cod. opção	Opções de proteção (VPRs)	Custo (USD) - X	% atenuação para o 137Cs - A	Peso (kg) - P	Conforto - C (nota qualitativa)	Descontaminação superficial - D (nota qualitativa)
0	ProTech Plus (caso básico)	\$50	0	-	-	SIM (1)
1	DEMRON Class 2 Full Body Suit	\$3.199,00	1	4,8	Algum desconforto (0,25)	SIM (1)
2	DEMRON Full Body Suit	\$1.999,00	1	5,20	Algum desconforto (0,25)	SIM (1)
3	DEMRON Radiation Torso Vest 1Ply	\$699,00	2	2,54	Confortável (0,75)	PARCIAL (0,5)
4	DEMRON Radiation Torso Vest 2Ply	\$1.199,00	3	2,57	Confortável (0,75)	PARCIAL (0,5)
5	HKX 1558 Whole Body Anti-Radiation Wear	\$950,00	4	10,10	Difícil de usar (0)	SIM (1)
6	DEMRON Radiation Torso Vest 4Ply	\$2.100,00	5	4,30	Confortável (0,75)	PARCIAL (0,5)
7	BIORUBBER RSM Tipo XIE-400 4mm (Vest + Pants)	\$2.540,34	6	13,9	Confortável (0,75)	PARCIAL (0,5)
8	Df Vest (W-2 mm)	\$2.750,00	16	18	Sem desconforto (0,5)	PARCIAL (0,5)
9	STEMRAD 360γ	\$6.000,00	41	14	Muito confortável (1)	NÃO (0)

4.1.1 ANÁLISE DE PRIORIDADES COM ATRIBUTOS MÚLTIPLOS PARA SELEÇÃO DAS VPRS

Na técnica de prioridades com atributos múltiplos será estudado a influência de todos os atributos qualitativos e difíceis de serem mensurados conjuntamente, para o caso de seleção das vestimentas.

Essa técnica consiste em agregar pontos aos atributos pertinentes e a opção que tiver a maior quantidade de pontos terá a preferência ou a prioridade sobre as demais opções. Se duas opções empatarem não haverá preferência de uma sobre a outra. Para aplicação dessa técnica foram selecionados os seguintes atributos: atenuação da radiação ionizante, custo de proteção, conforto, peso, descontaminação superficial da VPR. Na Tabela 10 estão listados os atributos com as respectivas constantes de crescimento e as funções de prioridade parciais.

Tabela 10 – Atributos e as respectivas constantes de crescimento e funções de prioridade parcial.

Atributos	Constantes de crescimento (k_j)	Funções de prioridade parcial (u_j)
Custo de proteção da VPR	$k(X)$	$u(X)$
Atenuação da radiação ionizante	$k(A)$	$u(A)$
Peso da VPR	$k(P)$	$u(P)$
Conforto da VPR	$k(C)$	$u(C)$
Descontaminação superficial da VPR	$k(D)$	$u(D)$

A função de análise de prioridades com atributos múltiplos, U_i , representa a figura de mérito ou “prioridade total” para cada opção i . Esta função pode ser expressada de uma forma aditiva, válida quando todos os fatores são independentes entre si:

$$U_i = \sum_{j=1}^n k_j u_j$$

Onde,

n é o número de fatores;

u_j é a função de prioridade parcial que representa a figura de mérito da opção i para o fator j ;

k_j é uma constante de crescimento que expressa a importância relativa ou o elemento de ponderação atribuído a cada fator j ; estas constantes são geralmente normalizadas de modo que o somatório dos k_j seja igual a 1;

Realizando o desmembramento da função de atributos múltiplos para o presente trabalho, temos que:

$$U_i = u(A).k(A) + u(X).k(X) + u(C).k(C) + u(P).k(P) + u(D).k(D)$$

Onde,

$u(A)$, $u(X)$, $u(C)$, $u(P)$, $u(D)$ são as funções de prioridade parcial;

$k(A)$, $k(X)$, $k(C)$, $k(P)$, $k(D)$ são as constantes de crescimento, que fornecem a importância relativa de cada atributo.

Tendo especificado os atributos (ou fatores) de proteção radiológica relevantes a serem incluídos no estudo de otimização das vestimentas e quantificado as consequências de cada opção de proteção em termos desses fatores, foi utilizado o seguinte critério para a prioridade parcial, u_j , dos atributos na análise das opções. Geralmente, o melhor resultado ou a menor consequência adversa para cada atributo (por exemplo, menor custo, dose coletiva mínima) foi dado uma prioridade parcial, u_j , de 1 e a pior consequência, uma prioridade parcial de 0.

Para adquirir os valores das outras opções, considera-se que todos os atributos são funções lineares e são conhecidos os 2 pontos extremos. Como considera-se que todos obedecem a equação da reta: $ax + by + c = 0$, é possível encontrar os demais pontos, que serão atribuídos às opções que têm valores intermediários.

No custo de proteção, assume-se que a função de prioridade parcial vale 1 para o custo da opção 3 e zero para o custo da opção 9. Fazendo-se este gráfico com os dois pontos extremos, consegue-se encontrar os outros pontos intermediários da função $u(X)$ como se observa na Figura 21.

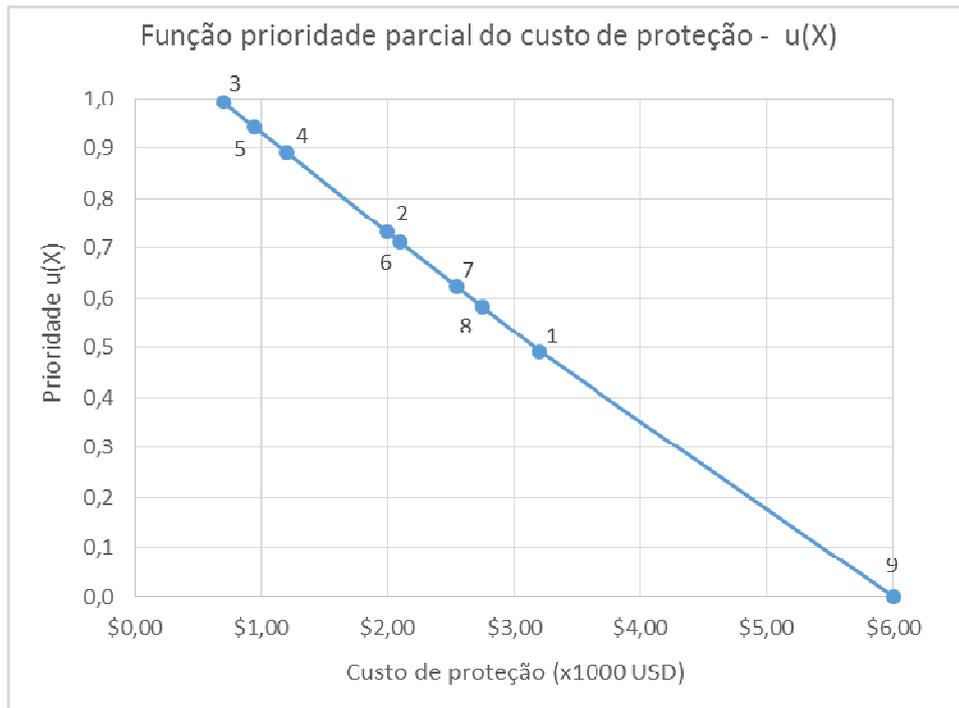


Figura 21 – Função prioridade parcial do custo de proteção das VPRs – $u(X)$.

Os gráficos das funções prioridade parcial para o percentual de atenuação para o ^{137}Cs , peso da VPRs são mostrados nas figuras Figura 22 e Figura 23, respectivamente.

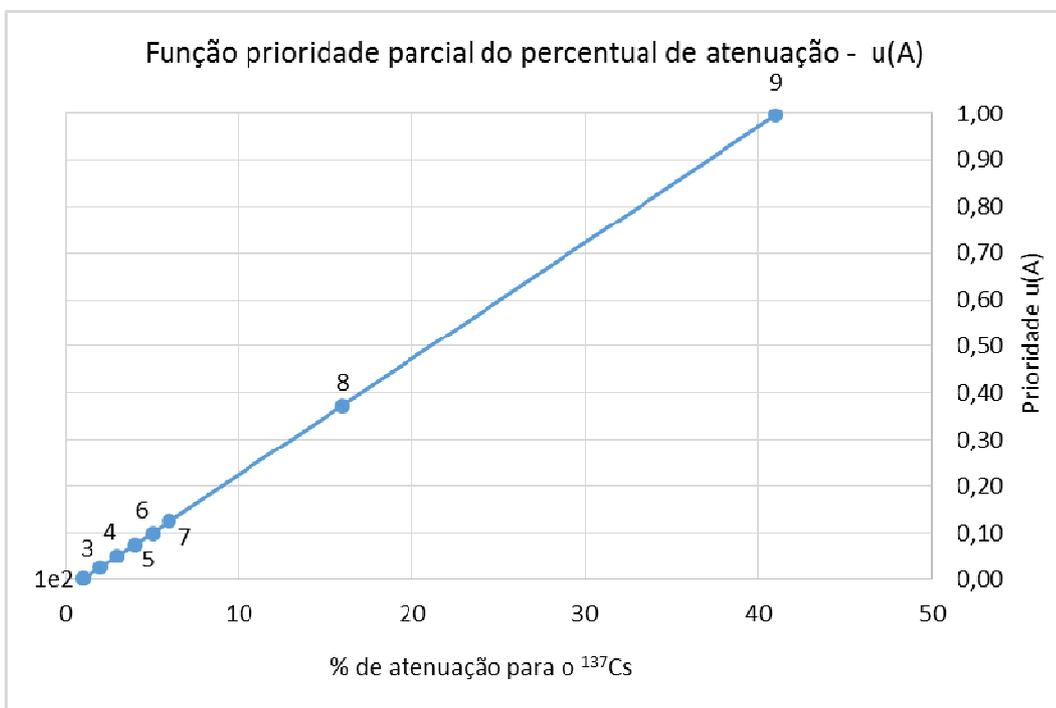


Figura 22 – Função prioridade parcial do % de atenuação para o ^{137}Cs – $u(A)$.

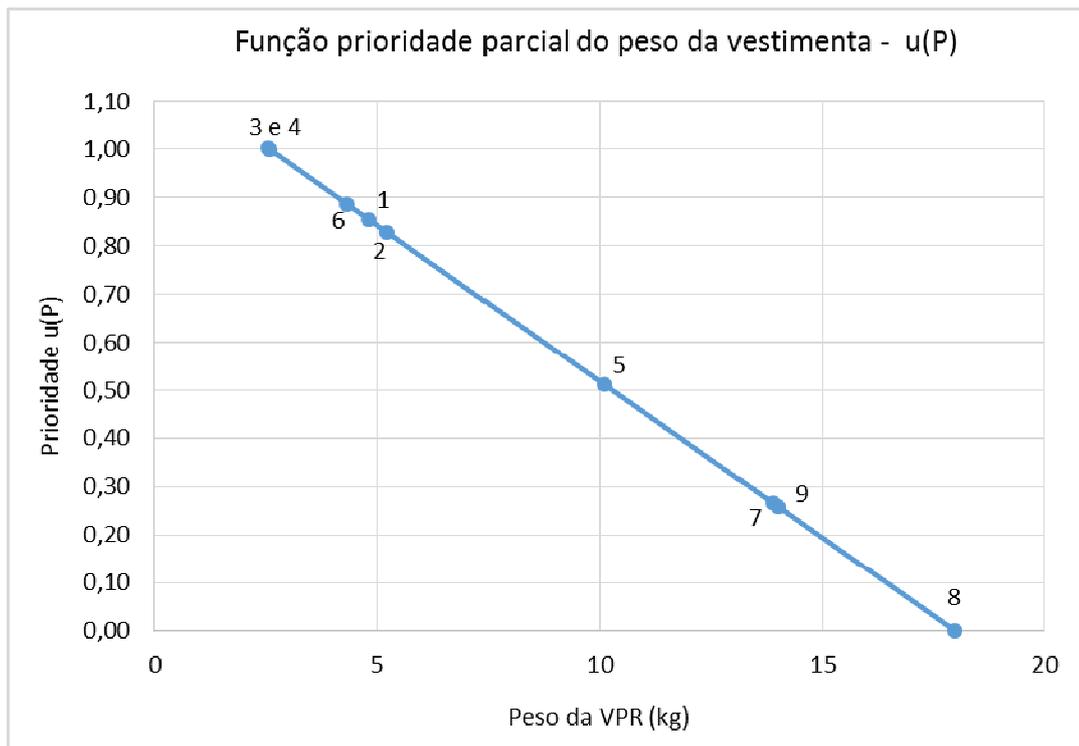


Figura 23 – Função prioridade parcial do peso da VPR – u(P).

Para continuidade do estudo da técnica de atributos múltiplos foi necessário transformar a avaliação qualitativa do conforto e da descontaminação superficial em funções de prioridade. Também para ambos foram escolhidas funções lineares. Na determinação do atributo conforto, como não se possui as vestimentas para testes em laboratório, foram definidos os valores de acordo com informações disponibilizadas pelos fabricantes e o enfoque que foi dado pelo fabricante no desenvolvimento da VPR. Assim sendo, a prioridade máxima (=1) foi atribuída às vestimentas de proteção que deram grande enfoque ao conforto da VPR e a prioridade mínima (=0) foi atribuída à vestimenta que não fez menção a esta característica em sua descrição.

Já para a determinação do atributo de descontaminação superficial, foram definidas três situações de acordo com cada vestimenta e com a resposta à seguinte pergunta: “a vestimenta é de fácil descontaminação superficial?”. Mais uma vez, com informações dos fabricantes das vestimentas, foi concluído que as vestimentas de corpo inteiro são as únicas projetadas com tal facilidade de descontaminação superficial. Já as vestimentas de proteção local, como precisam ser utilizadas em complemento de outros EPIs, para evitar a contaminação superficial, podem ou não possuir esta característica. Portanto, a prioridade

máxima (=1) é atribuída às vestimentas de proteção de corpo inteiro e a prioridade mínima (=0) foi atribuído à vestimenta que não fez menção a esta característica em sua descrição.

Os gráficos das funções prioridade parcial para o conforto e para descontaminação superficial são mostrados na Figura 24 e Figura 25, respectivamente.

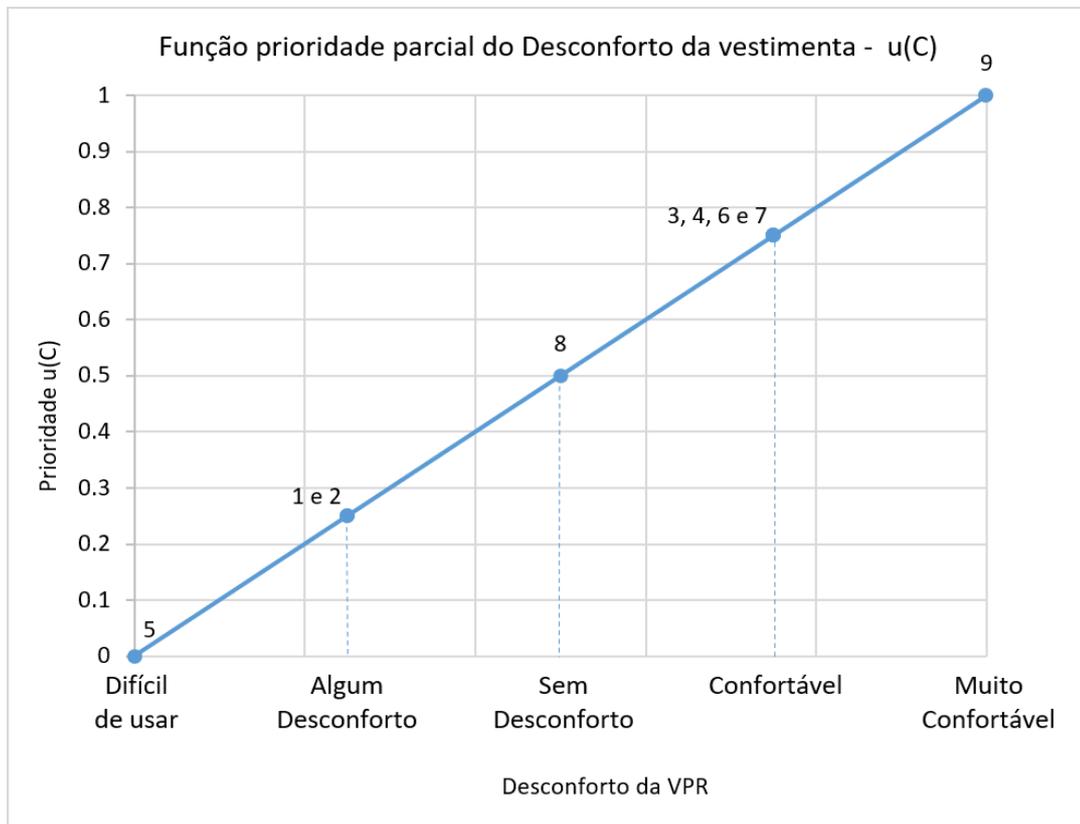


Figura 24 – Função prioridade parcial para o conforto da VPR – $u(C)$.

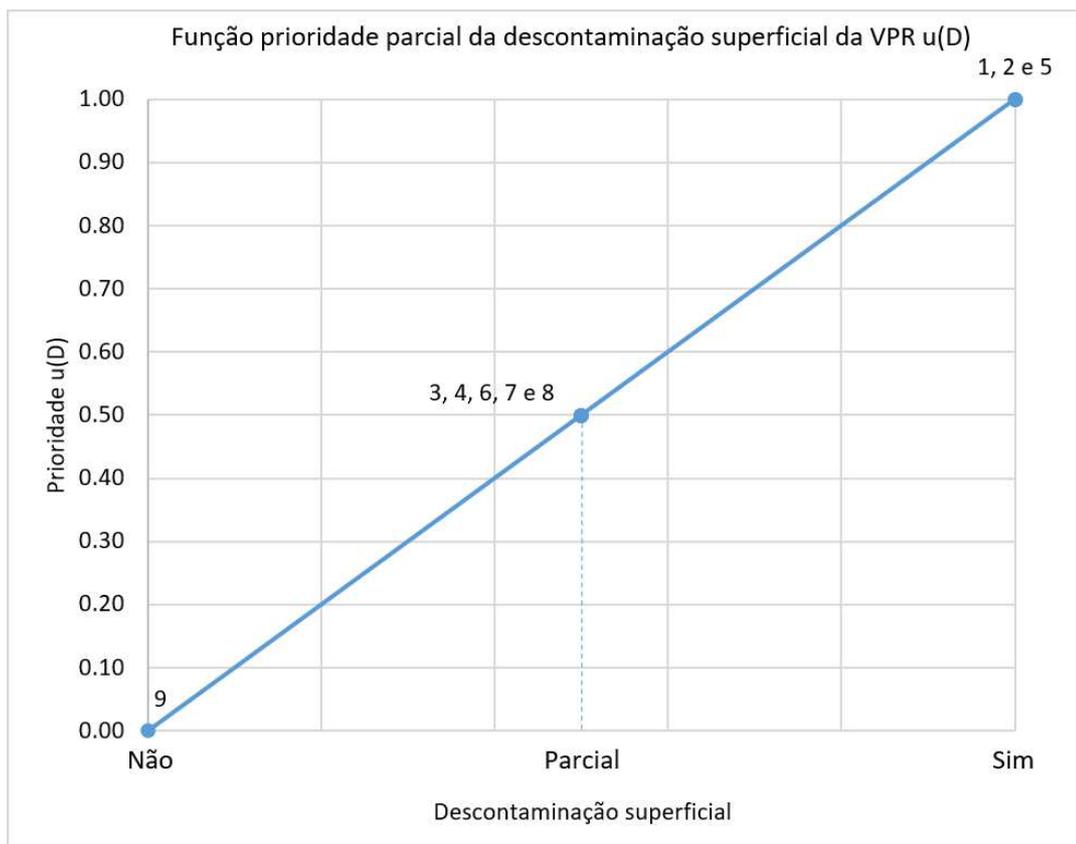


Figura 25 – Função prioridade parcial para a descontaminação superficial da VPR – $u(D)$.

Os valores das prioridades parciais são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise de prioridade parciais para as opções consideradas.

Cod. opção	Custo (USD) - X	% aten. para o ^{137}Cs - A	Peso (kg) - P	Conforto - C	Desc. Superficial - D	Prioridades Parciais				
						$u(X)$	$u(A)$	$u(P)$	$u(C)$	$u(D)$
1	\$3.199,00	1	4,8	Algum desconforto	SIM	0,49	0	0,85	0,25	1
2	\$1.999,00	1	5,20	Algum desconforto	SIM	0,73	0	0,83	0,25	1
3	\$699,00	2	2,54	Confortável	PARCIAL	1	0,02	1	0,75	0,5
4	\$1.199,00	3	2,57	Confortável	PARCIAL	0,89	0,05	1	0,75	0,5
5	\$950,00	4	10,10	Difícil de usar	SIM	0,94	0,07	0,51	0	1
6	\$2.100,00	5	4,30	Confortável	PARCIAL	0,71	0,10	0,89	0,75	0,5
7	\$2.540,34	6	13,9	Confortável	PARCIAL	0,62	0,12	0,26	0,75	0,5
8	\$2.750,00	16	18	Sem desconforto	PARCIAL	0,58	0,37	0	0,5	0,5
9	\$6.000,00	41	14	Muito confortável	NÃO	0	1	0,26	1	0

Colocando em prática o método da avaliação por razões de substituição, inicialmente, foram colocados os atributos de forma decrescente de importância com relação ao custo da proteção, que **não** é o atributo de maior importância, porém é muito mais intuitivo responder a seguinte pergunta com relação ao custo: quanto você está disposto a pagar se for da maior para a menor dose individual? Respondendo a esta pergunta para todos os atributos pertinentes tem-se as seguintes equações, na coluna (a) da Tabela 12 com relação ao custo de proteção, e na coluna (b) da Tabela 12, a conversão para o atributo de atenuação da radiação.

Tabela 12 – Constantes de crescimento em ordem decrescente de importância: (a) com relação ao custo de proteção; (b) com relação a atenuação de radiação para o Césio-137 (atributo de maior importância).

Atributos	(a) com relação ao custo de proteção	(b) com relação a atenuação da radiação
Atenuação da radiação ionizante (A)	$k(A) = 1,7 k(X)$	$k(A)$
Conforto (C)	$k(C) = 1,3 k(X)$	$k(C) = 0,76 k(A)$
Custo de proteção (X)	$k(X)$	$k(X) = 0,58 k(A)$
Peso (P)	$k(P) = 0,7 k(X)$	$k(P) = 0,41 k(A)$
Descontaminação superficial (D)	$k(D) = 0,3 k(X)$	$k(D) = 0,17 k(A)$

Realizando a normalização dos K, temos que:

$$k(A) + k(X) + k(C) + k(P) + k(D) = 1, \text{ substituindo, temos}$$

$$k(A) + 0,76 k(A) + 0,58 k(A) + 0,41 k(A) + 0,17 k(A) = 1$$

$$\text{Portanto, } k(A) = 1/2,92 \text{ ou } k(A) = 0,34$$

Substituindo o valor de $k(A)$, tem-se as seguintes constantes de crescimento em ordem decrescente de importância apresentado na Tabela 13:

Tabela 13 – Constantes de crescimento calculadas após normalização, em ordem decrescente de importância.

Atributos	Resultado das constantes de crescimento (k_j)
Atenuação da radiação ionizante (A)	$k(A) = 0,34$
Conforto (C)	$k(C) = 0,26$
Custo de proteção (X)	$k(X) = 0,20$
Peso (P)	$k(P) = 0,14$
Descontaminação superficial (D)	$k(D) = 0,06$

Tabela 14 – Análise de prioridade parciais com crescimento e prioridades totais para as opções consideradas.

Cod. Opção de proteção	Prioridades parciais					Prioridades parciais com crescimento					Prioridades Totais
	u(X)	u(A)	u(P)	u(C)	u(D)	k(X)·u(X)	k(A)·u(A)	k(P)·u(P)	k(C)·u(C)	k(D)·u(D)	$U_i = \sum_{j=1}^n k_j u_j$
1	0,49	0	0,85	0,25	1	0,20·0,49	0	0,14·0,85	0,26·0,25	0,06·1	0,34
2	0,73	0	0,83	0,25	1	0,20·0,73	0	0,14·0,83	0,26·0,25	0,06·1	0,39
3	1	0,02	1	0,75	0,5	0,20·1	0,34·0,02	0,14·1	0,26·0,75	0,06·0,5	0,57
4	0,89	0,05	1	0,75	0,5	0,20·0,89	0,34·0,05	0,14·1	0,26·0,75	0,06·0,5	0,56
5	0,94	0,07	0,51	0	1	0,20·0,94	0,34·0,07	0,14·0,51	0	0,06·1	0,35
6	0,71	0,10	0,89	0,75	0,5	0,20·0,71	0,34·0,10	0,14·0,89	0,26·0,75	0,06·0,5	0,53
7	0,62	0,12	0,26	0,75	0,5	0,20·0,62	0,34·0,12	0,14·0,26	0,26·0,75	0,06·0,5	0,43
8	0,58	0,37	0	0,5	0,5	0,20·0,58	0,34·0,37	0	0,26·0,5	0,06·0,5	0,40
9	0	1	0,26	1	0	0	0,34·1	0,14·0,26	0,26·1	0	<u>0,64</u>

As prioridades parciais com crescimento e as prioridades totais são apresentadas na Tabela 14. Para auxiliar o tomador de decisão, de acordo com a técnica de atributos múltiplos, a opção ótima é aquela que apresentar o maior valor das prioridades totais. Para as maiores importâncias sendo, a atenuação da radiação ionizante e o conforto da vestimenta, a vestimenta que apresentou o maior valor das prioridades totais, foi a opção 9, vestimenta STEMRAD 360^o, apresentada na seção 3.1.1.5.

4.1.2 ANÁLISE DE CRITÉRIOS MÚLTIPLOS EXCEDENTES PARA SELEÇÃO DAS VPRS

Para esta análise foram usados os mesmos cinco atributos da análise de prioridades com atributos múltiplos da seção 4.1.1, a saber: custo de proteção da VPR (X), atenuação da radiação ionizante para o ¹³⁷Cs (A), conforto da VPR (C), peso da VPR (P) e a descontaminação superficial (D) com os valores dados nas cinco primeiras colunas da Tabela 11. Um maior detalhamento desta técnica pode ser vista no APÊNDICE A: .

Também foram utilizados os mesmos valores das constantes de crescimento obtidos para os atributos pela análise realizada na seção 4.1.1, e apresentados na Tabela 13. Seguem os resultados obtidos:

$$k(A) = 0,34$$

$$k(C) = 0,26$$

$$k(X) = 0,20$$

$$k(P) = 0,14$$

$$k(D) = 0,06$$

Essa técnica compara cada opção *i* com as demais *m* para cada atributo e avalia se a opção *i* é preferível à opção *m*. Analisando-se a Tabela 14 e realizando o processo entre as opções 3 e 4, percebe-se que a opção 3 leva vantagem sobre a opção 4 apenas no custo de proteção, igualando-se nos quesitos peso, conforto e descontaminação superficial. Sendo a opção 4 mais vantajosa em termos de atenuação da radiação para o ¹³⁷Cs. Portanto, utilizando as constantes de crescimento já calculadas, soma-se as constantes de crescimento dos atributos onde a opção 3 é mais vantajosa ou igual à opção 4.

Desta maneira:

$$Ad_{3,4} = k(X) + k(C) + k(P) + k(D)$$

$$Ad_{3,4} = 0,20 + 0,26 + 0,14 + 0,06$$

$$Ad_{3,4} = 0,66; e$$

$$Ad_{4,3} = k(A) + k(C) + k(P) + k(D)$$

$$Ad_{4,3} = 0,34 + 0 + 0,26 + 0,14 + 0,06$$

$$Ad_{4,3} = 0,80$$

Onde:

$Ad_{3,4}$ = Indicador de vantagem da opção 3 sobre a opção 4. $Ad_{4,3}$ = Indicador de vantagem da opção 4 sobre a opção 3.

Neste caso, como o indicador de vantagem da opção 4 é maior do que para a opção 3, temos que a opção 4 é preferível à opção 3. Mas a análise completa será realizada após adicionar o critério de exclusão para o conforto da VPR. O cálculo de todos os indicadores de vantagens utilizados para a montagem da Tabela 15 estão demonstrados no APÊNDICE A: .

Na Tabela 15 são dados os indicadores de vantagem calculados desta forma. Por esta tabela vê-se que as opções de número mais elevado têm vantagens maiores do que aquelas de menor número.

Tabela 15 – Indicadores de vantagem para as opções consideradas, comparadas uma com as demais opções.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i	Ad_{i,m}								
1		0,8	0,06	0,06	0,46	0,06	0,2	0,2	0,4
2	0,86		0,06	0,06	0,46	0,26	0,4	0,4	0,4
3	0,94	0,94		0,66	0,60	0,66	0,66	0,66	0,40
4	0,94	0,94	0,80		0,40	0,66	0,66	0,66	0,40
5	0,60	0,60	0,40	0,60		0,26	0,40	0,40	0,40
6	0,94	0,74	0,66	0,66	0,74		0,66	0,66	0,40
7	0,80	0,60	0,66	0,66	0,60	0,66		0,66	0,40
8	0,80	0,60	0,4	0,40	0,60	0,40	0,40		0,26
9	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,74	0,74	

Como o objetivo do presente trabalho é selecionar a VPR que permita execução de tarefas de manutenção além de ser capaz de atenuar radiação ionizante, o conforto durante a utilização do equipamento de proteção foi o atributo selecionado para o critério de exclusão. Foi adotado como critério de exclusão (Ec) o desconforto provocado pela utilização da vestimenta, sendo definido como limiar de exclusão, $Ec = 0,4$. Por exemplo, a diferença entre as opções 3 e 4 é zero, que é menor que o valor do limiar de exclusão escolhido, portanto:

$$Ec_{3,4} = Ec_{4,3} = 0$$

Note que:

Se, $Ec_{i,m} \leq 0,4$, logo $Ec_{i,m} = 0$, caso contrário

$Ec_{i,m} > 0,4$, logo $Ec_{i,m} = 1$

Repetindo esta operação para as demais opções monta-se a Tabela 16.

Tabela 16 – Critérios de exclusão para as opções consideradas, comparadas uma com as demais para o conforto da vestimenta.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i	Ec_{i,m}								
1		0	1	1	0	1	1	0	1
2	0		1	1	0	1	1	0	1
3	1	1		0	1	0	0	0	0
4	1	1	0		1	0	0	0	0
5	0	0	1	1		1	1	1	1
6	1	1	0	0	1		0	0	0
7	1	1	0	0	1	0		0	0
8	0	0	0	0	1	0	0		1
9	1	1	0	0	1	0	0	1	

Aplicando o critério de exclusão para as opções consideradas ficamos com a Tabela 17.

Tabela 17 – Tabela final de comparação após aplicação dos critérios de exclusão para as opções consideradas, comparadas uma com as demais para o conforto da vestimenta.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i	Ad_{i,m}								
1		0,8			0,46			0,2	
2	0,86				0,46			0,4	
3				0,66		0,66	0,66	0,66	0,40
4			0,80			0,66	0,66	0,66	0,40
5	0,60	0,60							
6			0,66	0,66			0,66	0,66	0,40
7			0,66	0,66		0,66		0,66	0,40
8	0,80	0,60	0,40	0,40		0,40	0,40		
9			0,60	0,60		0,60	0,74		

Comparando as opções após aplicação do critério de exclusão, obtém-se as relações:

A opção 2 excede a opção 1.

A opção 4 excede a opção 3.

A opção 5 excede a opção 2.

As opções 6 e 7 não se excedem entre si mas excedem a opção 8.

A opção 8 excede a opção 2.

A opção 4 excede a opção 8.

A opção 9 excede a opção 4.

Comparando as opções que não se excluem e verificando os valores de índice de vantagem, temos que a opção 4 excede a 3, as opções 6 e 7 excedem a opção 8, mas não se excedem entre si, e que a opção 9 excede todas as outras opções, portanto, configurando-se novamente a vestimenta STEMRAD 360^o como a solução analítica.

Observamos que, mesmo com as técnicas completamente diferentes e com o uso de um critério de exclusão para o conforto da vestimenta, o resultado da solução analítica não foi afetado. A opção 9 continua sendo apontada como ótima, mostrando que o resultado global de uma análise depende dos dados de entrada e dos critérios especificados e não dos detalhes da técnica analítica.

4.1.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS CONSTANTES DE CRESCIMENTO

A análise de sensibilidade procura responder a pergunta "e se?" Por exemplo: e se variarmos os valores dos atributos ou dos critérios a opção ótima continuará sendo mantida ou será deslocada para outra opção? Desta maneira, a análise de sensibilidade é um teste para avaliar a robustez do resultado encontrado. Se, variando o valor de um atributo, encontrarmos sempre o mesmo resultado como opção ótima, diremos que é robusto à esta variável, mas, se no caso contrário, uma pequena variação no valor do atributo ou critério variar o resultado da opção ótima, diremos que o resultado é muito sensível a este atributo e a opção ótima deixa de ser confiável, pois uma pequena oscilação no atributo ou critério mudará o resultado ótimo.

No intuito de avaliarmos a robustez do resultado encontrado na aplicação das técnicas de Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos e Análise de Critérios Múltiplos Excedentes, modificamos os valores das constantes de crescimento kj.

Desta maneira, fizemos a seguinte análise: Variando-se a importância da atenuação da radiação com o conforto da opção de proteção, a fim de observar se mexendo nos atributos de maior valor alterar-se-ia o resultado da solução analítica. Também, foi realizado o decréscimo na importância do conforto na vestimenta, segundo atributo com o maior valor, para se verificar se diminuindo a importância, igualando-se com o atributo do peso seria observado variação na solução analítica. Por último, tendo em vista o limite para o razoavelmente exequível foi reduzida a relevância para o atributo de atenuação da radiação, aumentando-se, conseqüentemente, a importância do custo de proteção, a fim de verificar qual seria o comportamento da solução analítica. Isto se deve a dois motivos:

- 1) O fiscal de proteção radiológica está interessado em redução das doses individuais e coletivas dos IOEs, visando atendimento dos limites estabelecidos na norma no Brasil CNEN NN 3.01[4]. Por outro lado, a fonte pagadora está preocupada com o custo de proteção. Já, com relação ao conforto da vestimenta, existe um limite no qual os trabalhadores não conseguiriam executar as atividades de manutenção devido ao desconforto causado pela utilização da vestimenta, sendo, portanto, considerado um atributo relevante para a seleção da VPR ótima.
- 2) Através da análise de sensibilidade para verificar: Se variando cada uma das constantes de crescimento (K_i), de uma forma plausível, será que a opção se mantém ótima ou será alterada para uma nova opção de proteção? Se para uma pequena mudança nas constantes a solução deixa de ser ótima, a solução encontrada é fraca. No entanto, para uma mudança tecnicamente plausível, a solução se mantiver ótima, a solução analítica é robusta.

Inicialmente, foram invertidos os valores das importâncias da atenuação para o ^{137}Cs com o conforto da VPR, ficamos com as seguintes importâncias para a nova análise:

$$k(A) = 1,3 k(X)$$

$$k(C) = 1,7 k(X)$$

E os outros atributos continuam valendo $k(P) = 0,7 k(X)$ e $k(D) = 0,3 k(X)$. As constantes de crescimento passam a valer:

$$k(A) = 0,26$$

$$k(C) = 0,34$$

$$k(X) = 0,20$$

$$k(P) = 0,14$$

$$k(D) = 0,06$$

Observamos que apesar da inversão das importâncias das constantes de crescimento citadas o resultado da solução analítica não é afetado, continuando a opção 9 (STEMRAD 360^v) sendo apontada como ótima, pelas duas técnicas em estudo. Porém, pela análise de prioridades com atributos múltiplos, foi observado que as opções 3 e 4 despontaram dentre as demais ficando a opção 3 com 0,63, apenas um décimo de diferença com relação a opção ótima. Já pela análise de critérios múltiplos excedentes, temos que a opção 4 excede a 3 e que a opção 9 excede todas as opções, portanto continuando como a solução analítica. Na Tabela 18 tem-se o cálculo das prioridades totais para as novas constantes de crescimento.

Tabela 18 – Prioridade parciais com crescimento e totais para as novas constantes de crescimento.

Cod. Opção de proteção	Prioridades parciais com crescimento					Prioridades Totais
	$k(X) \cdot u(X)$	$k(A) \cdot u(A)$	$k(P) \cdot u(P)$	$k(C) \cdot u(C)$	$k(D) \cdot u(D)$	$U_i = \sum_{j=1}^{n_j} k_j u_j$
1	0,20·0,49	0	0,14·0,85	0,34·0,25	0,06·1	0,36
2	0,20·0,73	0	0,14·0,83	0,34·0,25	0,06·1	0,41
3	0,20·1	0,26·0,02	0,14·1	0,34·0,75	0,06·0,5	0,63
4	0,20·0,89	0,26·0,05	0,14·1	0,34·0,75	0,06·0,5	0,62
5	0,20·0,94	0,26·0,07	0,14·0,51	0	0,06·1	0,34
6	0,20·0,71	0,26·0,10	0,14·0,89	0,34·0,75	0,06·0,5	0,58
7	0,20·0,62	0,26·0,12	0,14·0,26	0,34·0,75	0,06·0,5	0,48
8	0,20·0,58	0,26·0,37	0	0,34·0,5	0,06·0,5	0,41
9	0	0,26·1	0,14·0,26	0,34·1	0	0,64

A opção 9 também se manteve como ótima, por ambas as técnicas de análise sob estudo, mantendo a importância original da atenuação da radiação ionizante do ¹³⁷Cs ($k(A) = 1,7k(X)$) e igualando o atributo conforto com o do peso ($k(C) = k(P) = 0,7k(X)$). Com isso foi

observado um leve aumento da importância do custo da opção de proteção, sem, contudo, alterar o resultado da opção ótima.

Porém, com uma considerável redução da importância da atenuação para o ^{137}Cs e igualando-se o conforto da VPR com o atributo peso, foi observado uma alteração da solução analítica, influenciada por uma maior relevância do custo da vestimenta de proteção. Seguem as novas constantes de crescimento calculadas para essa análise:

$$k(A) = 1,3 k(X)$$

$$k(C) = k(P) = 0,7 k(X)$$

$$k(D) = 0,3 k(X)$$

Como $k(A) + k(X) + k(C) + k(P) + k(D) = 1$, substituindo, temos

$$1,3 k(X) + k(X) + 0,7 k(X) + 0,7 k(X) + 0,3 k(X) = 1$$

$$k(X) = 1/4 \text{ ou } k(X) = 0,25$$

Substituindo o valor de $k(X)$, tem-se as seguintes constantes de crescimento

$$k(A) = 0,325$$

$$k(C) = 0,175$$

$$k(X) = 0,25$$

$$k(P) = 0,175$$

$$k(D) = 0,075$$

Na Tabela 19 tem-se o resultado das prioridades totais pela análise de prioridades com atributos múltiplos para as novas constantes de crescimento apresentadas, bem como a nova solução analítica como sendo a opção 3, a vestimenta DEMRON (Torso Vest 1Ply) da RST.

Tabela 19 – Prioridades parciais com crescimento e totais para as novas constantes de crescimento.

Cod. Opção de proteção	Prioridades parciais com crescimento					Prioridades Totais
	$k(X) \cdot u(X)$	$k(A) \cdot u(A)$	$k(P) \cdot u(P)$	$k(C) \cdot u(C)$	$k(D) \cdot u(D)$	$U_i = \sum_{j=1}^n k_j u_j$
1	0,25·0,49	0	0,175·0,85	0,175·0,25	0,075·1	0,39
2	0,25·0,73	0	0,175·0,83	0,175·0,25	0,075·1	0,45
3	0,25·1	0,325·0,02	0,175·1	0,175·0,75	0,075·0,5	0,60
4	0,25·0,89	0,325·0,05	0,175·1	0,175·0,75	0,075·0,5	0,58
5	0,25·0,94	0,325·0,07	0,175·0,51	0	0,075·1	0,42
6	0,25·0,71	0,325·0,10	0,175·0,89	0,175·0,75	0,075·0,5	0,53
7	0,25·0,62	0,325·0,12	0,175·0,26	0,175·0,75	0,075·0,5	0,41
8	0,25·0,58	0,325·0,37	0	0,175·0,5	0,075·0,5	0,39
9	0	0,325·1	0,175·0,26	0,175·1	0	0,54

Pela análise de critérios múltiplos excedentes, temos que a opção 4 excede a 3 e que entre a opção 9 e 4 não se excedem entre si. Portanto, a solução analítica será fruto do critério de desempate escolhido.

Os três conjuntos de valores atribuídos para as constantes de crescimento, discutidos neste capítulo, apresentaram os resultados, conforme Tabela 18 e Tabela 19. Quando reduzimos consideravelmente importância máxima do atributo atenuação $k(A)$, conforme Tabela 19, o resultado da solução analítica passa a ser a opção 3, sendo a opção 9 superada pelas opções 3 (solução ótima) e 4. Foi observado que com a diminuição das constantes de crescimento citadas, para qualquer um dos atributos, ocorre um respectivo aumento da importância do custo de proteção da VPR. E para o caso de reduções significativas, temos que, de certo modo, ocorre um aumento proporcional da importância do custo. Sendo a opção 9 (STEMRAD 360°) a de maior custo de proteção, o resultado é fortemente influenciado pela importância do custo.

Deixaremos para trabalhos futuros uma análise de sensibilidade completa sobre todas as constantes de crescimento. Evidentemente, a variação destes novos valores deve estar

dentro do intervalo razoavelmente aceitável. Estes próximos trabalhos poderiam evidenciar se em um futuro, não muito longínquo, essa opção ótima possa ser alterada para outra.

5. PROTÓTIPO DE VPRN

A fim de propor o desenvolvimento de uma Vestimenta de Proteção Radiológica Nacional (VPRN), com base nos resultados obtidos, é importante primeiramente definir os seguintes pontos:

- Definição do tipo de vestimenta: de corpo inteiro ou de proteção local;
- Definição do material para confecção da VPR; e
- Seleção dos principais atributos para a VPR.

A definição da área a ser protegida do corpo humano pela vestimenta é uma das etapas iniciais que se deve levar em conta no projeto de uma VPR. Se será uma vestimenta de corpo inteiro ou apenas de proteção local. A Tabela 2 apresenta a evolução dos fatores de ponderação nos tecidos e órgãos de acordo com as publicações 26, 60 e 103 CIPR e que em sua grande maioria se encontram na região torácica e pélvica, dentre eles a medula óssea que é um dos órgãos mais sensíveis à radiação ionizante. Portanto, como sugestão, seria interessante o desenvolvimento de uma VPRN de proteção local, com foco na proteção da medula óssea e de órgãos da região pélvica.

De acordo com WATERMAN et al. [31], foi desenvolvida a vestimenta STEMRAD 360^o, que foca na proteção da medula óssea, apresentando os melhores resultados de proteção radiológica dentre todos os modelos estudados. Segundo WATERMAN et al. [31], a probabilidade de recuperação no caso de uma Síndrome Aguda de Radiação (SAR) está diretamente relacionada com a capacidade de proteção de parte da medula óssea do indivíduo.

A opção STEMRAD 360^o foi apontada como solução analítica por ambas as técnicas de otimização utilizadas quando é dado maior importância aos atributos de atenuação da radiação para o ¹³⁷Cs e conforto provocado pela utilização da vestimenta. Portanto, será considerada como modelo ideal para o desenvolvimento da VPRN. A aquisição de um exemplar da vestimenta poderia proporcionar realização de outros ensaios com outras fontes

de radiação, realizar um estudo de “engenharia reversa” a fim de definir os materiais utilizados, o processo de fabricação, teste de ergonomia para realização das principais atividades de manutenção, entre outras análises.

A Figura 18 mostra em detalhes a vestimenta STEMRAD 360^o [31], onde podem ser observados os principais materiais utilizados, bem como sua disposição e uma sugestão para o processo de fabricação. Desta forma a sequência de laminação e colagem dos materiais na confecção de uma VPRN poderiam seguir a mesma lógica. Como parte estruturante teria duas lâminas de aço inoxidável nas extremidades e uma série de elementos de fixação, em material não identificado.

Para a blindagem foram utilizadas 9 lâminas de chumbo colocadas entre folhas de teflon, para permitir deslizamento entre elas. Duas lâminas de chumbo são colocadas na região central posterior da VPR. Toda esta estrutura é envolta por uma bolsa de selagem, também em material não identificado e coberta com tecido kevlar.

A partir do estudo completo desta vestimenta modelo, elaborar, em conjunto com um especialista têxtil e de proteção radiológica, o projeto para o desenvolvimento da VPRN (protótipo) a qual poderá ser avaliada e testada com apoio do programa de Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, a partir da realização de outros mestrados e doutorados, até a consolidação de um produto que seja de interesse para confecção e comercialização por uma empresa nacional.

5.1 Teste da VPRN

Após a confecção da VPRN protótipo, este deverá ser testado por um aparato para medição da capacidade de atenuação da radiação. Como referência poderia ser preparado um esquema para verificar a atenuação da radiação similar ao apresentado pelas referências [34] e [35], onde foram comparadas diferentes vestimentas, com foco em proteção radiológica. Na Figura 26 é apresentado um esquema da disposição dos equipamentos de medição e das respectivas fontes puntiformes de radionuclídeos. As amostras das VPRs são colocadas em um suporte metálico entre a fonte e o detector numa distância predefinida, a fim de atender o menor tempo morto possível do detector e evitar falsa coincidência de pulso.

Na Figura 27, tem-se uma foto do dispositivo para medição da radiação sendo utilizado numa vestimenta DEMRON da empresa *Radiation Shield Technology*.

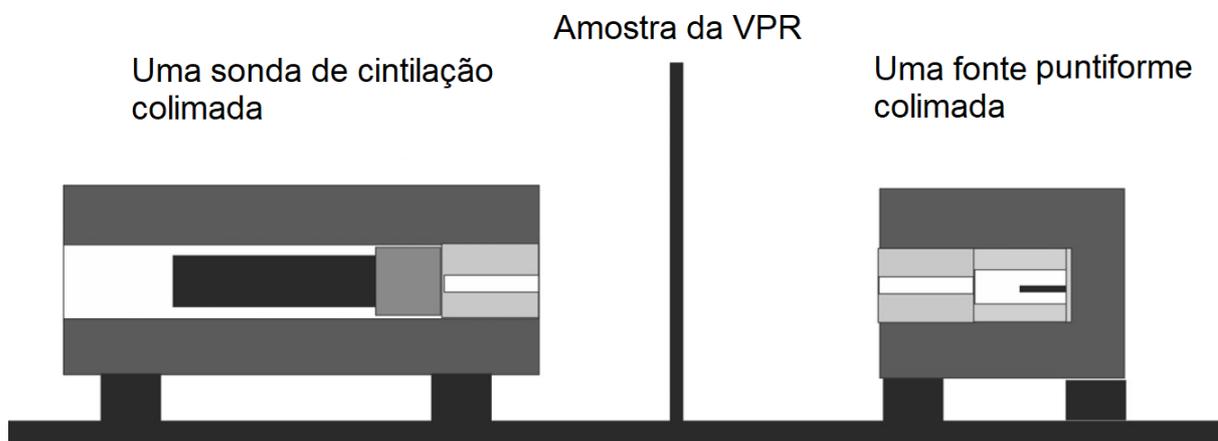


Figura 26 – Esquema da bancada de teste para medição da radiação nas VPRs [34].

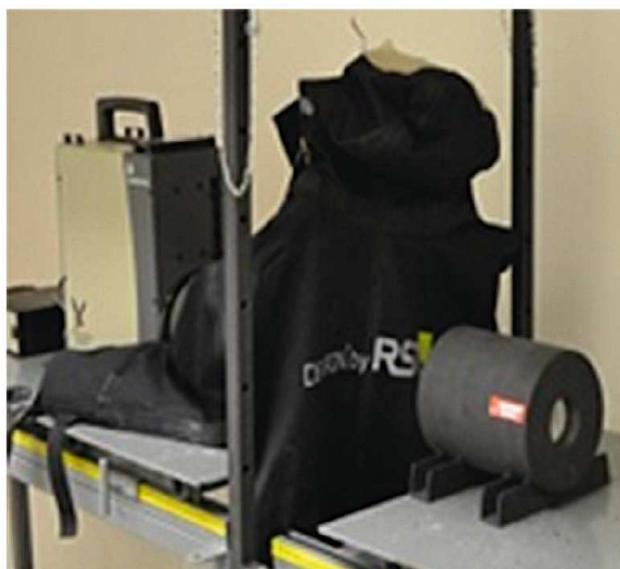


Figura 27 – Arranjo da bancada de medição com a vestimenta DEMRON da RST [35].

O dispositivo montado em [34] e [35] utilizou espectros de raios X e gama que foram originários de diferentes fontes puntiformes de radionuclídeos e, para medição da radiação foram utilizados dois espectrômetros portáteis: um InSpector 1000 com sonda de cintilação IPROL-1 destacável LaBr₃ e um detector Falcon 5000 HPGe, ambos fabricados por Canberra Industries, Inc., EUA. Para montagem de um dispositivo como esse no IPEN, seria necessário verificar quais seriam os equipamentos de medição portátil disponíveis e que atenderiam as faixas de medição. A Figura 28 mostra uma foto do dispositivo de medição com a utilização do detector portátil FALCON 5000.

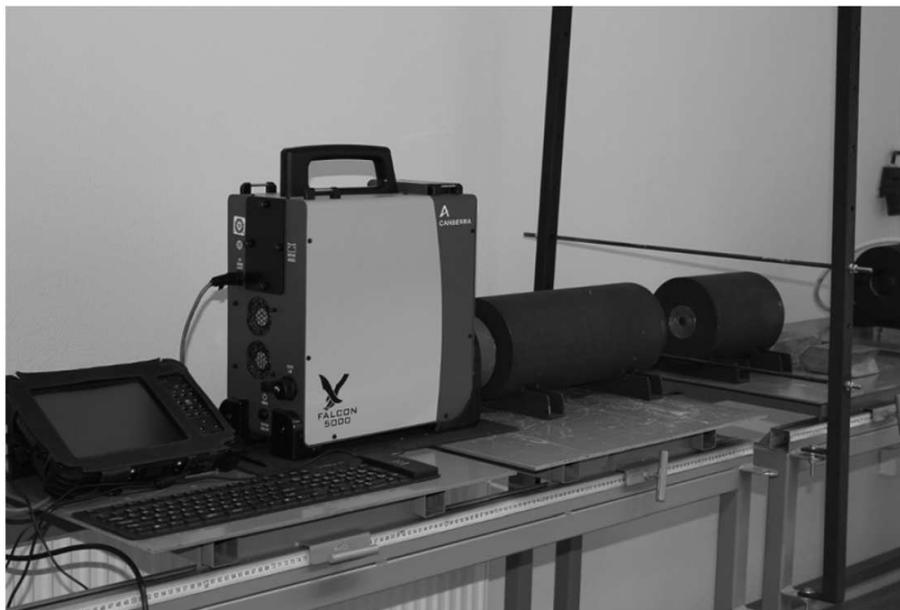


Figura 28 – Arranjo da bancada de medição com foco no detector FALCON 5000.

Para o presente trabalho não foi possível a realização de simulação da atenuação de uma VPRN pelo método de Monte Carlo. Poderá ser realizada uma simulação com a VPRN definida, a fim de verificar a capacidade de atenuação das radiações ionizantes, de acordo com as blindagens selecionadas para a vestimenta. A partir dos resultados da simulação pelo método Monte Carlo, poderia, caso sejam viáveis, iniciar a aquisição dos materiais para confecção da vestimenta.

Por fim, como parte do processo de teste da vestimenta, deverá ser realizado uma pesquisa de ergonomia com profissionais de manutenção de centrais nucleares a respeito da utilização da VPRN, com o levantamento da opinião dos usuários sobre a praticidade, conforto e as considerações de ergonomia para realização de certas atividades de manutenção.

6. CONCLUSÃO

A partir dos estudos foi possível conhecer as principais vestimentas de proteção radiológica que, internacionalmente, são produzidas e comercializadas. Utilizando-se as técnicas de ajuda para a tomada de decisão foi mostrado que a vestimenta STEMRAD 360γ é o melhor equipamento de proteção radiológica com foco no conforto e atenuação dos raios gama.

Com a análise de sensibilidade das constantes de crescimento, pudemos concluir que a solução ótima é fortemente influenciada quando se é dado maior importância para o custo da proteção. Porém, para o caso de seleção de uma vestimenta para manutenção de Planta Nuclear Móvel (PNM) para propulsão de um meio naval, para se atender aos requisitos de proteção radiológica e de ergonomia dentro de um espaço limitado, o custo de proteção não é tão relevante frente à capacidade de atenuação e do conforto provocado pela vestimenta.

Para o desenvolvimento de uma VPRN a partir do melhor resultado obtido das VPRs, atualmente disponíveis no mercado, o próximo passo seria a aquisição da vestimenta selecionada para comprovação de ensaios de laboratórios, bem como para desvendar os materiais e processo de sua fabricação, a partir de uma engenharia reversa. São necessárias muitas etapas para a criação e melhoramento de um produto, começando pela comprovação dos resultados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. Para aprofundar o estudo da vestimenta ideal será de grande valia, para todos da proteção radiológica nacional, procurar empresas parceiras, inicialmente para o desenvolvimento e fabricação de um protótipo, a fim de ensaiar o seu desempenho em laboratório. Caso os resultados sejam satisfatórios, apresentar o projeto para fabricação de uma Vestimenta de Proteção Radiológica Nacional e dar início ao registro de patente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Antes da entrada em operação do LABGENE, RMB e Submarino com propulsão Nuclear Brasileiro (SN-BR), poderão ser tomados em consideração os possíveis trabalhos futuros, a partir da aquisição da vestimenta selecionada:

- 1) Realização de análise completa de sensibilidade, onde deveriam ser testados todos os atributos e constantes de crescimento.
- 2) Elaborar um modelo para simulação em Monte Carlo a fim de averiguar informações de atenuação disponibilizadas pelo fabricante.
- 3) Realizar ensaio da vestimenta selecionada no laboratório de metrologia das radiações a fim de verificar a capacidade de atenuação da radiação informada pelo fabricante.
- 4) Estudo de ergonomia e de conforto para utilização da vestimenta selecionada, por equipes especializadas em manutenção de usinas nucleares, bem como por equipes de primeiro combate a acidentes nucleares da Marinha do Brasil. Também poderiam ser realizadas simulações de manutenção de equipamentos da planta nuclear, em ambiente seguro, para observação de tempo, capacidade de realização dos movimentos, e execução de tarefas específicas em espaço confinado.
- 5) Realização do estudo detalhado dos materiais que compõem a vestimenta selecionada neste trabalho, realizando ensaios de Microscopia eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria Eletrônica, entre outros, a fim de determinar materiais utilizados. Realizar uma pesquisa de preço, disponibilidade dos materiais necessários em âmbito nacional, e o custo de fabricação para confecção de VPRN. Por fim, a partir do estudo de exemplar proposto, definir o processo de fabricação, juntamente com especialista têxtil, para confecção de uma VPRN.
- 6) Realização de ensaio para medir a capacidade de atenuação da VPRN, no laboratório de Metrologia da Radiação do IPEN, para o Césio-137 a fim de comparar com os dados da vestimenta selecionada, bem como ensaiar a VPRN para energias maiores, como por exemplo, para o Cobalto-60 e verificando a capacidade de atenuação para energias maiores.
- 7) Realizar estudos de ergonomia e conforto da VPRN, fazer um levantamento do custo de fabricação em série, além de propor melhorias para fabricação de um protótipo para

homologação e registro de patente para a VPRN. Fazer um estudo completo de otimização da vestimenta.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Respirators and Protective Clothing**, Safety Series No. 22, IAEA, Vienna (1967).
- [2] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Implications of Commission Recommendations That Doses be Kept as Low as Readily Achievable**, publicação ICPR 22, Viena, 1973.
- [3] TUFAIL, M., LEE, H., KIM, M., KIM, K., **The Design of personal Protective Garments for workplace: An Ergonomic Radiation Protection Design Practice**. Springer International Publishing AG, 2018.
- [4] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Diretrizes Básicas de Radioproteção**, CNEN NE-3.01, CNEN, Rio de Janeiro (2014).
- [5] Department of the Navy, Naval Nuclear Propulsion Program, **"Occupational Radiation Exposure from U.S. Naval Nuclear Plants and their Support Facilities"** (REPORT NT-18-2), May 2018.
- [6] KALOSHKIN, S.D., TCHERDYNTSEVA, V.V., GORSHENKOVA, M.V., GULBINA, V.N., KUZNETSOVB, S.A., **Radiation-protective polymer-matrix nanostructured composites**. Journal of Alloys and Compounds, Volume 536, Supplement 1, 25 September 2012, Pages S522-S526.
- [7] PEREIRA A.G., VERGARA L.G.L. **Aspectos ergonômicos da vestimenta de proteção radiológica**. CONGRESSO REGIONAL LANINOAMERICANO IRPA DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA, 10th, 12-17 Abril, 2015, Buenos Aires, Argentina.
- [8] D.E. GÜNDOĞDU, S. OVACILLI. **Personal Protective Equipment for Ionizing Radiation Protection in Health Sector**. International Conference on Occupational Radiation Protection (IAEA-CN-223), Vienna, Austria, 2014.
- [9] SOARES F.A.P, PEREIRA A.G, FLÔR R.C. **Utilização de vestimentas de proteção radiológica para redução de dose absorvida: uma revisão integrativa da literatura**. Radiol Bras. 2011 Mar/Abr; 44(2):97–103.
- [10] VIRGINIA CLASS - SUBMARINE: Full scale reverse engineering of a Virginia class nuclear fast attack submarine. New River Community College, Dublin, Virginia, USA. Disponível em: <https://www.nr.edu/cad/vaclass.php>. Acesso em: 12 nov. 2019.

[11] UNSCEAR (2000). **Sources and effects of ionizing radiation**. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with scientific annexes. New York: United Nations.

[12] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and Decision-Making in Radiological Protection**, publicação ICRP 55 Ann. ICRP 20 (1). Viena, 1990.

[13] PEREZ, C.F.A. **Otimização em Radioproteção**. Dissertação (mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1996.

[14] LEVY, D.S. **Contribuição para informatização dos programas de proteção radiológica para instalações radiativas**, Dissertação (mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2012.

[15] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, publicação ICRP 60 Ann. ICRP 21 (1-3). Viena, 1991.

[16] Su, X. D., Zhang G. L., Xu, S. P. et al. **Attenuation coefficients of gamma and X-rays passing through six materials**. NUCL SCI TECH 31, 3 (2020). <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0717-9>.

[17] NAMBIAR, S., YEOW, J.T.: **Polymer-composite materials for radiation protection: grid information services for distributed resource sharing**. ACS Appl. Mater. Interfaces. 4(11), 5717–5726 (2012).

[18] MIRZAEI M, ZARREBINI M, SHIRANI A, SHANBEH M, BORHANI S. **X-ray shielding by a novel garment woven with melt-spun monofilament weft yarn containing lead and tin particles**. Textile Research Journal. 2019; 89(1): 63-75. DOI:10.1177/0040517517736475

[19] AYGÜN, H.H., ALMA, M.H. **Bismuth (III) oxide/polyethylene terephthalate nanocomposite fiber coated polyester spunbonds for ionizing radiation protection**. Appl. Phys. A126, 693 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03880-0>.

[20] RAJESHWARI, M., LOBO, B., **Radiation shielding materials: A brief review on methods, scope and significance**, Proc. National Conference on 'Advances in VLSI and Microelectronics', Pages (96-100), India, 2017.

[21] GAVRISH, V.M., BARANOV, G.A., CHAYKA, T.V., DERBASOVA, N.M., LVOV, A.V., MATSUK, Y.M.: **Tungsten nanoparticles influence on radiation protection properties of**

polymers. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 110, no. 1, p. 012028. IOP Publishing (2016).

[22] GARCIA L. A, RAMÍREZ V.G, MENDIGUREN S. R, BRONCANO J., AQUERRETA J.D, **Ergonomics of the workplace in radiology.** Radiol. Engl. Ed. 53(6), 507–515 (2011).

[23] KIM, J., SEO, D., LEE, B. C., SEO, Y. S., MILLER, W.H., **Nano-W Dispersed Gamma Radiation Shielding Materials,** Advanced Engineering Materials, Volume 16 (9) – Jan 1, 2014.

[24] MANSOURI, E., MESBAHI, A., MALEKZADEH, R., MANSOURI, A. **Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration.** Radiat Environ Biophys 59, 583–600 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00865-8>.

[25] Kalkornsurapranee, E., Kothan, S., Intom, S. et al. **Wearable and flexible radiation shielding natural rubber composites: Effect of different radiation shielding fillers.** Radiation Physics and Chemistry 179 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109261>.

[26] SHARMA N., NAIR A., GUPTA B., KULSHRESTHA S., GOEL R., CHAWLA R. **Chapter 6 - Chemical, biological, radiological, and nuclear textiles: current scenario and way forward.** Advances in Functional and Protective Textiles, Woodhead Publishing, 2020, Pages 117-140, ISBN 9780128202579. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820257-9.00006-0>.

[27] FRIEDMAN, H; SINGH, M. S. **Radiation Transmission Measurements for Demron Fabric.** Lawrence Livermore National Laboratory, work for Others proposal L-9771. Livermore, CA (2003).

[28] MANUFACTURER: RADIATION SHIELD TECHNOLOGIES: **Demron is a radiation-blocking fabric made by Radiation Shield Technologies.** Radiation Shield Technologies, Coral Gables, Florida, USA. Disponível em: <https://www.radshield.com/demron/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

[29] YAMANISHI, H., TETSUO, I., YAMAMOTO, T., YAMAMOTO, T., YAMAMOTO, K. **Development and utilization of gamma-ray shielding suit excellent easy-to-wear.** 13th International Congress of the IRPA, P09.15, Glasgow, 2012.

[30] MANUFACTURER: BIORUBBER RADIATION SHIELD MATERIAL:**BIORUBBER RSM a material for Shielding Radiation.** Radiation Shield Material, Disponível em: https://www.yamamoto-bio.com/yamamoto_e/rsm/index.html. Acesso em: 29 Agosto 2021.

[31] WATERMAN G., KASE K., ORION I., BROISMAN A., MILSTEIN O. **Selective Shielding of Bone Marrow: An Approach To Protecting Humans From External Gamma Radiation.**

Health Physics Volume 113 (3) – Set, 2017. DOI: 10.1097/HP.0000000000000688

[32] MANUFACTURER: STEMRAD: **STEMRAD | Radiation Protection and Radiation Shield.** StemRad Ltd. 522 N. Howard Ave Tampa, Florida, Disponível em: <https://stemrad.com/>. Acesso em: 06 Setembro 2021.

[33] Protective Clothing and Products for the Nuclear Industry. Unitech, USA. Disponível em: <http://www.unitechus.com/literature/protective-clothing-and-products-for-the-nuclear-industry/>. Acesso em: 12 nov. 2019.

[34] KOZLOVSKA, M., CERNY, R., OTAHAL, P. **Attenuation of X and Gamma Rays in Personal Radiation Shielding Protective Clothing.** Health Physics, Volume 109, no. supplement 3, pp. S205-S211, 2015. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000361>.

[35] KOZLOVSKA, M., SOLC, JAROSLAV., OTAHAL, P. **Measuring and Monte Carlo Modelling of X-Ray and Gamma-Ray Attenuation in Personal Radiation Shielding Protective Clothing.** Hindawi, (2019), ID 1641895. <https://doi.org/10.1155/2019/1641895>.

APÊNDICE A: ANÁLISE DE CRITÉRIOS MÚLTIPLOS EXCEDENTES: DETALHES PARA O CÁLCULO

1) Foram usados os mesmos cinco atributos da análise de prioridades com atributos múltiplos, a saber:

- Custo de proteção da VPR (X),
- Atenuação da radiação ionizante para o ^{137}Cs (A),
- Conforto da VPR (C),
- Peso da VPR (P); e
- A descontaminação superficial (D).

2) Também foram utilizados as mesmas constantes de crescimento para os atributos pela análise realizada na seção 4.1.1, e apresentados na Tabela 13. Repetem-se aqui os resultados obtidos:

TABELA A1 – IMPORTÂNCIAS DOS ATRIBUTOS E CONSTANTES CRESCIMENTO NORMALIZADAS, EM ORDEM DECRESCENTE DE IMPORTÂNCIA.

Atributos	Constantes de crescimento (k_j)	Normalização das constantes de crescimento (k_j)
Atenuação da radiação ionizante (A)	1,7 $k(X)$	$k(A) = 0,34$
Conforto (C)	1,3 $k(X)$	$k(C) = 0,26$
Custo de proteção (X)	$k(X)$	$k(X) = 0,20$
Peso (P)	0,7 $k(X)$	$k(P) = 0,14$
Descontaminação superficial (D)	0,3 $k(X)$	$k(D) = 0,06$

3) **Indicadores de vantagem:** A comparação por pares das opções (vestimentas de proteção radiológica) para formação dos indicadores de vantagem, usa os mesmos valores das constantes de crescimento obtidos para os atributos pela técnica de análise de prioridades de atributos múltiplos. É, portanto, iniciada a construção da Tabela A2 com a disposição dos indicadores de vantagens em suas respectivas posições. E como exemplo, foram selecionados cinco pares, aleatoriamente, para construção de forma detalhada dos indicadores de vantagens, conforme quadro a seguir:

TABELA A2 – EXEMPLO DA COMPOSIÇÃO DOS INDICADORES DE VANTAGENS PARA AS POSIÇÕES SELECIONADAS.

$Ad_{i,m}$	Descrição da composição dos indicadores de vantagens.	$\Delta d_{i,m} = \sum k_j a_j$
$Ad_{1,2}$	A partir da Tabela 11, a opção 1 só é mais vantajosa do que a opção 2 para a atenuação da radiação. Para os demais fatores, empata com a opção 2.	$k(A) + k(P) + k(C) + k(D)$ $\Sigma = 0,80$
$Ad_{2,1}$	A partir da Tabela 11, a opção 2 é mais vantajosa do que a opção 1 para o custo de proteção. Para os demais fatores empata com a opção 1.	$k(X) + k(A) + k(C) + k(D)$ $\Sigma = 0,86$
$Ad_{1,3}$	A partir da Tabela 11, a opção 1 só é mais vantajosa do que a opção 3 quanto a descontaminação superficial. Para os demais fatores a opção 3 leva vantagem.	$k(D)$ $\Sigma = 0,06$
$Ad_{3,1}$	A partir da Tabela 11, a opção 3 é mais vantajosa do que a opção 1 em todos os atributos, exceto a descontaminação superficial.	$k(X) + k(A) + k(P) + k(C)$ $\Sigma = 0,94$
$Ad_{3,4}$	A partir da Tabela 11, a opção 3 é mais vantajosa do que a opção 4 para o custo de proteção. Para os demais fatores, empata com a opção 4.	$k(X) + k(P) + k(C) + k(D)$ $\Sigma = 0,66$
$Ad_{4,3}$	A partir da Tabela 11, a opção 4 é mais vantajosa do que a opção 4 para a atenuação da radiação. Para os demais fatores, empata com a opção 3.	$k(A) + k(P) + k(C) + k(D)$ $\Sigma = 0,80$
$Ad_{5,6}$	Conforme a Tabela 11, a opção 5 é mais vantajosa do que a opção 6 para o custo de proteção e para a descontaminação superficial. Para os demais fatores a opção 6 leva vantagem.	$k(X) + k(D)$ $\Sigma = 0,26$
$Ad_{6,5}$	Conforme a Tabela 11, a opção 6 é mais vantajosa do que a opção 5 para a atenuação da radiação, Peso e conforto da vestimenta. Para os demais fatores a opção 5 leva vantagem.	$k(A) + k(P) + k(C)$ $\Sigma = 0,74$
$Ad_{4,9}$	Conforme a Tabela 11, a opção 4 é mais vantajosa do que a opção 9 para o custo de proteção, Peso e descontaminação superficial da vestimenta. Para os demais fatores a opção 9 leva vantagem.	$k(X) + k(P) + k(D)$ $\Sigma = 0,40$
$Ad_{9,4}$	Conforme a Tabela 11, a opção 9 é mais vantajosa do que a opção 4 para a atenuação da radiação e o conforto da vestimenta. Para os demais fatores a opção 4 leva vantagem.	$k(A) + k(C)$ $\Sigma = 0,60$

Após a comparação por pares de todas as opções de proteção consideradas, temos a composição da Tabela 15, do texto principal. As opções de número mais elevado têm vantagens maiores do que aquelas de menor número.

4) **Critério de Exclusão:** Para aplicação do critério de exclusão no problema de seleção das vestimentas de proteção radiológica, foi selecionado o conforto da vestimenta como critério de exclusão. Sendo discriminado, pelo tomador de decisão, as opções de proteção que não oferecem um conforto mínimo durante a utilização da vestimenta, sendo estabelecido um limiar de exclusão, $E_c = 0,4$.

O módulo da diferença entre as prioridades parciais para o atributo conforto entre as opções de proteção (vestimentas), é o resultado para os critérios de exclusão, $E_{c,i,m}$, para as respectivas opções de proteção. Como exemplo, foi montada a tabela dos critérios de

exclusão, para as mesmas posições selecionadas aleatoriamente para seção 3 anterior, e está demonstrado na Tabela A3.

Se, $Ec_{i,m} \leq 0,4$, logo $Ec_{i,m} = 0$, caso contrário

$Ec_{i,m} > 0,4$, logo $Ec_{i,m} = 1$

TABELA A3 – EXEMPLO DA COMPOSIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO PARA AS POSIÇÕES SELECIONADAS.

$Ec_{i,m}$	Descrição da composição dos indicadores de vantagens.	$ Ec_{i,m} - Ec_{m,i} $
$Ec_{1,2}$ $Ec_{2,1}$	A partir da Tabela 11, a diferença entre das prioridades parciais do conforto, entre as opções 1 e 2, é $ 0,25 - 0,25 = 0$, que é menor do que 0,40.	$Ec_{1,2} = Ec_{2,1} = 0$
$Ec_{1,3}$ $Ec_{3,1}$	A partir da Tabela 11, a diferença entre das prioridades parciais do conforto, entre as opções 1 e 3, é $ 0,25 - 0,75 = 0,5$, que é maior do que 0,40.	$Ec_{1,3} = Ec_{3,1} = 1$
$Ec_{3,4}$ $Ec_{4,3}$	A partir da Tabela 11, a diferença entre das prioridades parciais do conforto, entre as opções 3 e 4, é $ 0,75 - 0,75 = 0$, que é menor do que 0,40.	$Ec_{3,4} = Ec_{4,3} = 0$
$Ec_{5,6}$ $Ec_{6,5}$	A partir da Tabela 11, a diferença entre das prioridades parciais do conforto, entre as opções 5 e 6, é $ 0 - 0,75 = 0,75$, que é maior do que 0,40.	$Ec_{5,6} = Ec_{6,5} = 1$
$Ec_{4,9}$ $Ec_{9,4}$	A partir da Tabela 11, a diferença entre das prioridades parciais do conforto, entre as opções 4 e 9, é $ 1 - 0,75 = 0,25$, que é menor do que 0,40.	$Ec_{4,9} = Ec_{9,4} = 0$

Repetindo-se esta operação para todas as opções monta-se a tabela de critérios de exclusão para as opções consideradas, comparada cada uma com as demais, para o conforto das vestimentas, que está apresentada no texto principal do documento, na Tabela 16.

Por fim, com esses dois conjuntos de resultados, é montada a tabela final de comparação, após aplicação dos critérios de exclusão para as opções consideradas, tendo sido eliminadas as opções onde foi encontrado $Ec_{i,m} = 1$, evitando-se assim as vestimentas que causam prejuízo muito grande para o quesito de conforto. A Tabela 17, no texto principal, apresenta a tabela final que é subsídio para montagem das relações excedentes, que estão todas apresentadas na seção 0.

ANEXO A (RADIATION SHIELD TECHNOLOGIES)

CATÁLOGO DO FABRICANTE RADIATION SHIELD TECHNOLOGIES (RST)



Radiation Shield Technologies

A New Protection Breakthrough Against CBRNe

ISO 9001
ISO 13485
ISO 8194
C E R T I F I E D



Radiation Shield Technologies

Tel: 866.7DEMIRON | Fax: 866.5DEMIRON

www.RadShield.com



A New Protection Breakthrough

Radiation Shield Technologies is a global leader in multi-hazard universal protective apparel. **RST**® has developed **Demron™**, a patented nano-composite that offers unique protection against chemical, biological, radiological, nuclear, and ballistic (CBRNE) threats. Additionally, because of its thermoconductive capabilities, it is self-cooling and reduces IR detection.

With an ever-increasing risk of biological, chemical, radiological, nuclear, heat, and ballistic threats there is an obvious need to provide military and first responder personnel with universal multi-hazard protection. Current PPE's such as CBRNE suits only provide BC protection and because they are thermo-insulators they also trap heat and cannot be externally cooled. Ballistic vests and shields also provide no protection against ionizing gamma radiation, produce significant heat stress, and offer no reduction in IR surveillance detection.

Demron™ is unique in that it is the only CBRNe Class 2 Style PPE multi-hazard fabric that offers protection against ionizing gamma radiation, reduces heat stress, is anti-ballistic, and attenuates heat signatures for IR detection reduction. **Demron™** is flexible, light weight, tear resistant, splash resistant and has the feel and coolness of liquid metal. It does not lose its effectiveness when exposed to liquids and salts, has a long shelf life, and is re-usable.

Our current line of products includes a full body CBRNe class 2 style, level B suit, high energy Radiologic/Nuclear ballistic suppression blankets, tactical anti-nuclear/ radiological vests, and we have nearly completed the development of a IIIa ballistic vest that has anti-radiation protection, passive cooling, and IR detection reduction for stealth operations and friendly fire reduction risk.



DEMIRON™ W CBRN ENSEMBLE

The Only True Anti-Nuclear, CBRN Now with Self-Cooling Stealth Technology



The only CBRN multi-hazard suit with true anti-nuclear protection.

Demiron™ is the only CBRN fabric that offers true resistance against Radiological and Ionizing Nuclear Radiation.

The Demiron™ Radiation Protection Suit was engineered to provide universal protection against chemical, biological, non-ionizing radiation, and ionizing radiation. Demiron™ reduces heat stress by allowing better heat dissipation than any other impermeables.

According to Lawrence Livermore National Defense Laboratory, the suit is an excellent shield of high energy beta particles, such as those emitted from Strontium-90, and provides at least 50% shielding of gamma rays up to 130 Kev.

Other BC suits are heat sinks. With very little activity, heat will build up in the suit and it will continue to climb at rest. Because they are insulating, they cannot be cooled externally. Only the Demiron™ suit reduces heat stress production, passively cools, and the first responder can be externally cooled without the need to be de-gowned.



Demiron™ Full Body CBRN Tactical Suit

Source	Type	Energies	Dose Reduction (%)
50 krp	X-ray	50 kv	≥ 75%
75 krp	X-ray	75 kv	≥ 60%
100 krp	X-ray	100 kv	≥ 60%
3H-AU	Gamma (γ)	4.9% 20.8 KeV	≥ 85%
		13.3% 13.9 KeV	
		19.3% 17.8 KeV	
137Cs	Gamma (γ)	22 KeV Major	≥ 91%
		88 KeV Minor	
60Co	Gamma (γ)	0.662 MeV	~ 1%
		1.173 MeV	≤ 1%
137Cs / 60Co	Beta (β)	1.332 MeV	75%
		546 KeV (β)	
		2.27 MeV (γ)	

Standard Features:

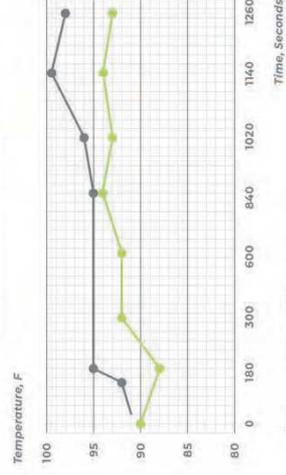
- Full chemical and biological resistance
- CBRN heat sealed seams
- CBRN zipper
- Self-cooling
- Reduces IR detection
- Built-in booties and gloves
- CBRN face seal

Options and Accessories:

- CBRN mask, gloves and boots

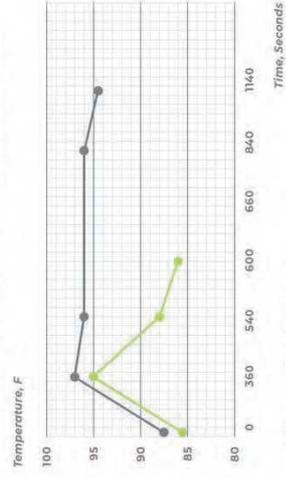
Full Body Suit Heat Stress Temperature Comparison

Each suit was worn on a treadmill at 3.5 mph for 10 min (600sec) and allowed to passively cool at amb T.



Full Body Suit Showing Active External Cooling Capability Comparison

Each suit was worn on a treadmill at 3.5 mph for 3 min and then actively cooled with a wet t-shirt and fanned at 25 mph. The water temp on t-shirt was 74 F.



DEMIRON™ FULL BODY SUIT

The Only True Anti-Nuclear, CBRN Now with Self-Cooling Stealth Technology



Demiron™ is the only CBRN fabric that offers true resistance against Radiological and Ionizing Nuclear Radiation.

The **Demiron™** Radiation Protection Suit was engineered to provide universal protection against chemical, biological, non ionizing radiation, and ionizing radiation. **Demiron™** reduces heat stress by allowing better heat dissipation than any other impermeables. According to Lawrence Livermore National Defense Laboratory, the suit is an excellent shield of high energy beta particles, such as those emitted from Strontium-90, and provides at least 50% shielding of gamma rays up to 130 Kev. **Demiron™** fabric has been tested by several DOE labs for effectiveness against ionizing radiation.

Other BC suits are heat sinks. With very little activity, heat will build up in the suit and it will continue to climb at rest. Because they are insulating, they cannot be cooled externally. Only the **Demiron™** suit reduces heat stress production, passively cools, and the first responder can be externally cooled without the need to be de-gowned.



Demiron™ Full Body CBRN Tactical Suit

Source	Type	Energies	Dose Reduction (%)
50 kcp	X-ray	50 kv	≥ 75%
75 kcp	X-ray	75 kv	≥ 60%
100 kcp	X-ray	100 kv	≥ 60%
3H-Af	Gamma (γ)	4.9% 20.8 KeV	≥ 85%
		13.3% 13.9 KeV	
		19.3% 17.8 KeV	
35.7% 59.54 KeV			
137Cs	Gamma (γ)	22 KeV Major	≥ 91%
		88 KeV Minor	
60Co	Gamma (γ)	0.662 MeV	~ 1%
	Gamma (γ)	1.173 MeV	± 1%
		1.332 MeV	
90Sr / 90Y	Beta (β)	546 KeV (β)	75%
		2.27 MeV (β)	

Standard Features:

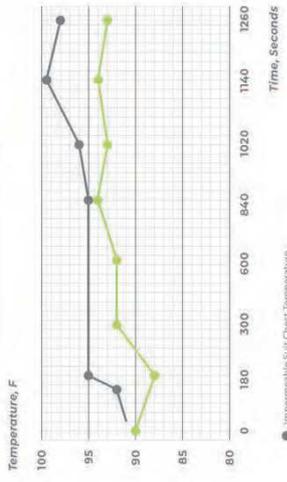
- Full chemical and biological resistance
- CBRN heat sealed seams
- Self-cooling
- Reduces IR detection

Options and Accessories:

- CBRN mask, gloves and boots

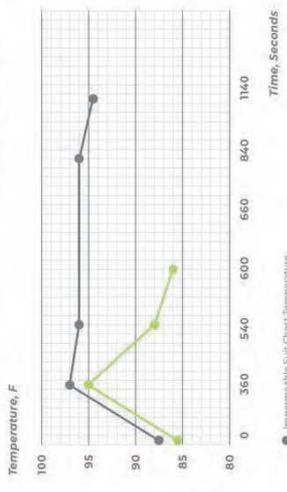
Full Body Suit Heat Stress Temperature Comparison

Each suit was worn on a treadmill at 3.5 mph for 10 min (600sec) and allowed to passively cool at amb T



Full Body Suit Showing Active External Cooling Capability Comparison

Each suit was worn on a treadmill at 3.5 mph for 3 min and then actively cooled with a wet t-shirt and fanned at 25 mph. The water temp on t-shirt was 74 F.





DEMIRON™ RADIATION TORSO VEST

**Shield Yourself with the
New and Advanced Cool
Stealth Technology**

**Demron™ Radiation Torso Vest now with cool
stealth technology.**

The **Demron™** Radiation self-cooling vest provides pure gamma reduction and self cooling to the first responder in a radiological event. The vest can be added to any BC suit to also provide true CBRN protection. Demron's Cool Stealth Technology also reduces IR detection for stealth operations.



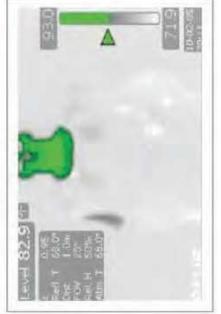
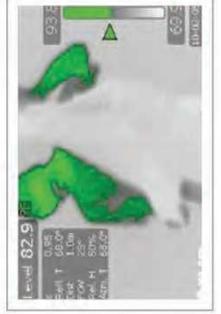
Demron™ Full Body CBRN Tactical Suit



Source	Type	Energies	Dose Reduction (%)
50 kVp	X-ray	50 kv	≥ 75%
75 kVp	X-ray	75 kv	≥ 60%
100 kVp	X-ray	100 kv	≥ 60%
241 Am	Gamma (γ)	4.9% 20.8 KeV	≥ 85%
		15.3% 13.9 KeV	
		19.3% 17.8 KeV	
		35.7% 59.54 KeV	
137 Cs	Gamma (γ)	22 KeV Major	≥ 91%
		88 KeV Minor	
60 Co	Gamma (γ)	0.662 MeV	~ 1%
		1.173 MeV	≤ 1%
90 Sr / 90 Y	Beta (β)	1.332 MeV	
		5.46 MeV (β)	75%
		2.27 MeV (β)	

Standard Features:

- 360 degree torso and groin coverage against gamma radiation
- Adjustable waist to fit any size
- Self cooling for increased sustainability
- Provides shielding to vital organs
- Poncho design allows for rapid deployment
- Specific molecular engineering provides protection against X-ray and low energy Gamma emissions
- Vest ensemble includes a removable thyroid protector
- Reduces IR detection for stealth operations
- Can be combined with standard BC suits to provide nuclear protection



ANEXO B (YAMAMOTO CORPORATION)

(BIORUBBER RSM - PROPOSAL)

(BIORUBBER RSM E-400 WEAR TYPE XI- PRICE DETAIL)



“Biorubber RSM” Proposal

1. Development Background

Yamamoto Corporation (hereafter referred to as “the company”) produced X-ray shielding material used for medical purposes up until about twelve years ago. In addition, from the 1980s through the first half of the 1990s, Yamamoto worked with a team researching shielding materials for nuclear fallout shelters, mainly in Europe.

Therefore, when it was forecast that the problems at the Fukushima nuclear plant caused by the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011, would continue for an extended period of time, the company applied its expertise in producing X-ray shielding materials to develop Biorubber RSM within a short period of time. Besides, On May 14, 2012, Kindai University and us jointly announced the paper presentation on "Effectiveness of our radiation shielding sheet and wear etc. *" at IRPA13 in Scotland.

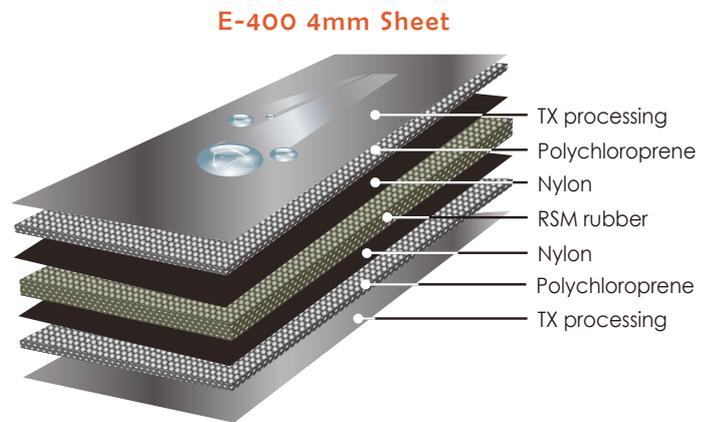
Yamamoto has also been conducting research on shielding beta rays. Products providing protection from either gamma rays or beta rays are now both widely used in Fukushima.

※* Development and utilization of gamma-ray shielding suit excellent easy-to-wear” Atomic Energy Research Institute, Kindai University, Yamamoto Corporation :March 14th 2012

2. The Material

The material is produced by employing proprietary technology that uniformly disperses a radiation-shielding heavy-metal alloy onto the company’s unique synthetic rubber with a closed-cell structure. With this unique technology, linear electromagnetic radiation waves (X-rays and gamma-rays) are diffused and reflected by the honeycomb structure, attenuating the radiation’s momentum and making it possible to limit the heavy-metal content to the minimum level. This enabled Yamamoto to make the material lightweight compared to previous radiation-shielding materials.

The vulcanized system rubber with a closed-cell structure also delivers superior flexibility and, compared to previous radiation-shielding materials, is also significantly more durable.



3. Tests

RSM rubber test materials are E-300 (4 mm), E-400 (4 mm), E-600 (3 mm), E-600 (6 mm). We measured radiation on each material.

RSM Shielding Rate from Caesium-137 Gamma Rays : test-1

Test facility: Kinki University Atomic Energy Research Institute

Used dosimeter: TCS-161 (Aloka)

Radiation source: Caesium-137 (1.8 MBq)

[Testing Method]

Dosimeter detection and radiation source interval set at 50mm, and test conducted by inserting each test subject into the detector.

	Ray source only	E-400 4mm	E-600 3mm	E-600 6mm
Maximum dose (μSv / h)	48.5	46.1	43.1	35.8
Average dose (μSv / h)	48.1	46.0	43.0	35.7
Shielding ratio (%)		4.4	10.5	25.7

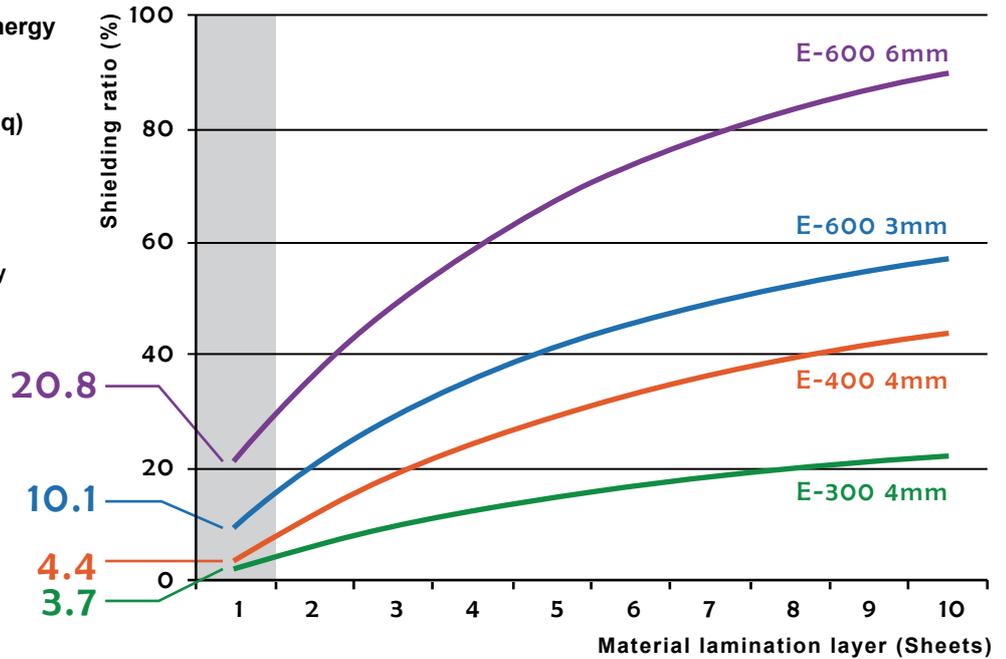
The following shielding effects have been confirmed by a different company in a radiation dosimetry measurement conducted near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant building.

RSM Shielding Rate from Caesium-137 Gamma Rays : test-2

Test facility: Kinki University Atomic Energy
Research Institute
Used dosimeter: TCS-161 (Aloka)
Radiation source: Caesium-137 (1.8 MBq)

[Testing Method]

Dosimeter detection and radiation source interval set at 300mm, and test conducted by inserting each test subject into the detector.



RSM Shielding Rate from Caesium-137 and Cobalt-60 Gamma Rays

Test facility: Kinki University Atomic Energy
Research Institute
Used dosimeter: TCS-161 (Aloka)
Radiation source: Caesium-137 (1.8 MBq)

[Testing Method]

Dosimeter detection and radiation source interval set at 300mm, and test conducted by inserting each test subject into the detector.

	E-400 4mm	E-600 3mm	E-300 4mm
Caesium-137 (%)	4.4	10.1	3.7
Cobalt-60 (%)	1.9	7.4	0.9

RSM Shielding Rate from X-ray

Test facility: Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute (TIRI)

X-ray device: MG-452 type (Yxlon International)

X-ray tube condition: 100 kV, 12.5 mA Additional filter plate 0.25 mm Cu

Used dosimeter: Ionization chamber irradiation dose rate meter RAMTEC - 1000D type A - 4 probe used (Toyo Medic)

[Testing Method]

JIS Z 4501 "Lead equivalent test method for X-ray protection products".

Dosimeter detection and radiation source interval set at 50mm.

	E-400 4mm	E-400 8mm	E-600 3mm	E-600 6mm
Lead equivalent (mmPb)	0.44 ±0.02	1.06 ±0.03	0.98 ±0.33	2.20 ±0.04

Similarly, the transmission dose of X-rays was measured to obtain the shielding power.

	E-400 4mm	E-400 8mm	E-600 3mm	E-600 6mm
Transmission dose rate (mGy / min)	0.38	0.054	0.067	0.003
Shielding ratio (%)	92.2	98.9	98.6	99.9

[Testing Method]

source interval set at 100mm.

YAMAMOTO CORPORATION

www.yamamoto-bio.com

[Headquarters]
yhq@yamamoto-bio.com
+81-6-6751-6134
5-13-11 Nakagawa, Ikuno-ku,
Osaka City 544-0005

[Tokyo Office]
tokyo-office@yamamoto-bio.com
+81-3-3400-6134
304 Jingu Heights, 6-33-14 Jingu-mae,
Tokyo 150-0001



山本化学工業正規印刷物

Biorubber RSM E-400 Wear typeXI



“Biorubber RSM E-400 Wear typeXI” is the latest version of radiation shield wear for 2012, evolved from model “E-400 Wear typeVII,” the radiation shield wear most used by workers dealing with the nuclear power plant accident.

The design of both the vest and pants has changed to make work easier compared to conventional wear. Even in work that requires frequent movement of the lower limbs, the genitalia - which are highly sensitive to radiation - are protected, while mobility of the lower limbs is improved by attaching the under protector to the wear. The radiation shielding effect is the same as the conventional E-400 Wear, and cuts 92.2% of X-rays, 4.4% of gamma-rays, and up to approximately 50% of mixed rays in a nuclear power plant area.

The most important feature of this product is the surface material of the wear, which is processed with a special surface processing technology “TX” that was developed for high-speed swimsuits by Yamamoto Corporation, which completely repels water that adheres to the surface. Accordingly, the product can be worn over radiation protective wear that prevents radioactive materials from adhering. There is also no draw-down of internal heavy metals commonly seen in shielding wear after several years of use.

Together the vest and the under-protector weigh only 4kg! The product’s shielding power and the shielding surface area are very ground-breaking even for a shielding wear.

Water repelling effect of the TX processed surface of the product



Parts	Size	Product dimension (mm)			Weight(kg)	Price	
Vest	L	Length	Front 580 / Back 690	Waist	880-980	Approx.4.0	
	LL		Front 600 / Back 710		980-1080		Approx.4.5
	3L		Front 630 / Back 740		1080-1180		Approx.5.0
	4L		Front 650 / Back 770		1180-1280		Approx.5.5
Pants	L	Length	330	Waist	850-970	Approx.2.7	
	LL		340		900-1020		Approx.2.9
	3L		350		1000-1120		Approx.3.1
	4L		360		1100-1220		Approx.3.3
Under-protector	F	Width	150	Length	720	Approx.0.5	24,000yen (tax not included)

YAMAMOTO CORPORATION

www.yamamoto-bio.com

[Headquarters]

yhq@yamamoto-bio.com

+81-6-6751-6134

5-13-11 Nakagawa, Ikuno-ku,

Osaka City 544-0005

[Tokyo Office]

tokyo-office@yamamoto-bio.com

+81-3-3400-6134

304 Jingu Heights, 6-33-14 Jingumae,

Tokyo 150-0001

*Please wear the product at your discretion.

*The product weight will vary depending on the size.

*The product’s water shedding effect will decrease if the surface of the product is rubbed forcefully while wet, so please dry the product carefully using a dry towel, etc.

*The product does not completely shield the user from radiation.

*Due to the product’s characteristics, there may be cases where the product size is slightly expanded or contracted.

*Actual product color may differ from photo due to printing conditions.

*Due to product improvements or upgrades some specifications may change without notice.

*The information in this catalog is as of September 30, 2016

ANEXO C (STEMRAD)

CATÁLOGO DO FABRICANTE STEMRAD (STEMRAD 360^Y)

DATASHEET - 360 GAMMA RADIATION PROTECTION VEST (SR-360-GA-PRO)

STEMRAD[®] 360^γ

Shielding Reactor Personnel from Gamma Radiation



High Dose
Reactor Activities



Aberrant Dose
Readings



Detection
Compromised



Emergency
Response



Current solutions protect personnel from alpha and beta radiation but do nothing to block gamma radiation.



By selectively shielding stem cell rich organs in the pelvic region, StemRad has made protection from gamma radiation possible.



StemRad's 360 Gamma reduces the probability of stochastic effects due to low dose exposures while preventing lethal deterministic effects following high dose exposures.



ALARA dictates dose reduction through 'time, distance, shielding'. StemRad enables shielding to save lives.



"StemRad has developed radiation protection for the day prevention fails."

*Four Star Admiral James Ellis,
former CEO of INPO*





Rapidly Deployable
From onsite FLEX dome inventory



Tested against Cs-137
Effective against High-Energy Gammas



Highly Ergonomic
Compatible with current PPE



Full Mobility
Positioned on the body's center of gravity



ALARA
Increased ROI on high-dose critical path tasks



Reduction in Cancer Incidence



Ovarian cancers
35%



Colon cancers
27%



Bladder cancers
22%



Stomach cancers
19%



Leukemias
19%

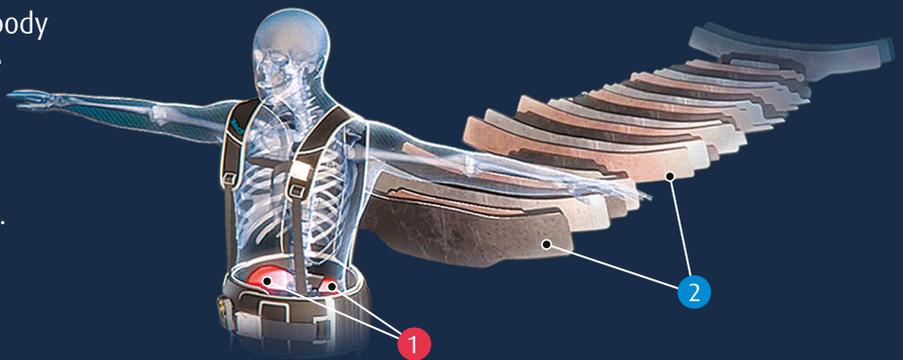
Prevention of Acute Radiation Syndrome**

Dose in Sv	1.5	2	3	4	5	6
% Lethality Unshielded	3.5%	6%	25%	50%	80%	95%
% Lethality Shielded	0%	0%	0%	0%	0%	0%

* survival will vary depending on radionuclide energy

1 By sparing a sufficient volume of the wearer's bone marrow, the 360 Gamma enables the body to perform its crucial life-saving regenerative biological processes post-exposure.

2 Patented internal structure ensures optimal protection while minimizing weight. The 360 Gamma accounts for pelvic bone marrow depth and the natural attenuation properties of human tissue.



"While whole body shielding is inherently heavy, partial body shielding is lighter in weight and selectively shields tissues of increased radiosensitivity (i.e. bone marrow) with substantial amounts of shielding material to protect hematopoietic functions; therefore, potentially preventing the acute health effects of exposure to gamma radiation (i.e. Acute Radiation Syndrome -ARS)." OECD Report on Occupational Radiation Protection in Severe Accident Management



DATASHEET 360^γ

360 Gamma Radiation Protection Vest (SR-360-GA-PRO)

The revolutionary StemRad 360 Gamma is the world's first wearable shield that provides meaningful protection against harmful gamma radiation. The shield's full compatibility with existing PPE and its optimized design, provide the wearer with the mobility required to perform critical tasks in the event of a nuclear incident.

Vest Features:



Six different sizes for optimal fit and comfort:

waist \ height	72-87 cm 28"-34"	88-104 cm 35"-41"	105-120 cm 42"-47"
182-200 cm 6'0"-6'7"	S Tall	M Tall	L Tall
150-181 cm 4'11"-5'11"	S Reg.	M Reg.	L Reg.

Unprecedented radiation attenuation levels



Position	Mean Attenuation
1	76%
2	67%
3	68%
4	34%
5	34%

* Caesium-137 Radiation Source

Fire Resistance

Tested to heat resistance at 180°C (ISO 17493) and flame spread (ISO 15025) in accordance with clauses 6.1 and 6.5 of EN 469:2005/A 1:2006+AC:2006. Was found to experience no ignition, melting or shrinkage due to the heat exposure and no flaming, hole formation, melting, flaming/molten debris, after-flame greater than 2s in duration, after-glow greater than 2s in duration, when exposed to flame.

Ballistic Protection

Tested in live range and found to meet NIJ STD 0101.04 Level IIIA Ballistics Protection.

Materials

Structure: Patented, variable thickness selective shielding architecture, which optimizes protection.

Shielding Core: Virgin Lead, Stainless Steel and Teflon- primary materials.

Harness: Kevlar.

Radiation Monitor + Pouch (SR-RAD-NUKAL)



A patented personal radiation meter, monitor and alarm. Affixed to the 360 Gamma shoulder strap with custom pouch, the device operates non-stop, 24/7 and will promptly warn the wearer of the presence of unseen, but acutely dangerous levels of radiation.

Always "ON" 24/7, includes long-life 10+ year battery.
 Detection Range: 100 mR/hr to 5,000 R/hr.
 Metering: 100 mR/hr to 50 R/hr, in 10 calibrated ranges.
 Gamma and X-rays from 20 keV to above 2 MeV.
 Includes a 10-year warranty.

5-year supply of Dosimeter cards (SR-DOS-5YCR)



Monitor radiation exposure (10 – 10,000 mSv).

When exposed to radiation, the sensing strip of SIRAD develops a blue color instantly and the color intensifies as the dose increases. Radiation exposure can be estimated simply by matching the color of the sensing strip(s) with the adjacent color reference bars.

Dosimeter card is inserted into slot on the inside of the 360 Gamma, thereby providing the shielded dose. Each year a new card will be sent to the purchaser.

Lightweight (~2g).
 Robust, unaffected by normal ambient conditions.
 Designed to be carried 24/7 and requires no batteries, calibration or maintenance.

Rolling Soft Case (SR-SOFT-CASE)



Custom tailored protective case for 360 Gamma, which is useful for transport or longterm storage.

Made of durable ballistic nylon.
 Rolls smoothly on premium caster wheels.
 Lightweight locking telescopic handle.

Carry-on sized case designed to fit in most airlines overhead compartments; 360 Gamma may not conform to some airlines carry-on standards.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
