INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Contribuição para otimização das doses individuais dos trabalhadores no processo de expedição do gerador de tecnécio-99m

Lizandra Pereira de Souza Fonseca

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

Orientador:
Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi

São Paulo
2010

À minha família

Agradecimentos

Ao Dr. Gian-Maria Sordi pela paciência, confiança e orientação.

Aos meus pais João e Ivone, ao meu esposo Alessandro, aos meus irmãos Eduardo, Fernanda e Ricardo e aos meus familiares pela paciência e carinho.

À Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP pela oportunidade e incentivo.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP pelas facilidades concedidas.

Aos funcionários do Centro de Radiofarmácia que colaboraram direta e indiretamente para realização deste trabalho.

Aos amigos Matias Puga Sanches e Eduardo Gerulis pelo estímulo científico.

Aos amigos Fábio Suzuki e Alessandra Machado pelas discussões, críticas e sugestões.

Às minhas amigas Amanda Juliene, Beatriz Guimarães, Christianne Cavinato, Ivani Fernandez, Maíra Tieme, Patrícia Lara e Selma Vilas Boas pelo apoio e motivação durante a realização desse trabalho.

E a todos que contribuíram direta e indiretamente na realização desse trabalho.

CONTRIBUIÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DAS DOSES INDIVIDUAIS DOS TRABALHADORES NO PROCESSO DE EXPEDIÇÃO DO GERADOR DE TECNÉCIO-99m

Lizandra Pereira de Souza Fonseca

RESUMO

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, pesquisa e produz radiofármacos que são distribuídos para todo o Brasil. Atualmente o radiofármaco com a maior quantidade de embalados expedidos por ano e com a maior atividade total é o gerador de tecnécio-99m. Com o intuito de diminuir as doses individuais dos trabalhadores envolvidos na produção de radiofármacos foi realizado um estudo de otimização da proteção radiológica no processo de expedição do gerador de tecnécio-99m, utilizando as técnicas de análise de custo-benefício diferencial, análise de custo-benefício integral, análise de prioridade com atributos múltiplos e análise com critérios múltiplos excedentes. Com alterações na configuração do embalado para despacho do gerador e com a aquisição de uma esteira transportadora foi possível estabelecer 4 opções de proteção. Os atributos considerados foram o custo da proteção, a dose coletiva, a dose individual e o esforço físico realizado pelo trabalhador para movimentar o embalado na falta da esteira. Para verificar a robustez das soluções analíticas encontradas com as técnicas utilizadas na otimização foi realizado um estudo de sensibilidade e foi constatado que a opção 3 é mais robusta que a opção 1, que deixa de ser a solução analítica com um aumento de R$ 20.000,00 no custo da proteção.

CONTRIBUTION TO OPTIMIZATION OF INDIVIDUAL DOSES OF WORKERS IN SHIPMENT OF GENERATOR TECHNETIUM-99m

Lizandra Pereira de Souza Fonseca

ABSTRACT

The Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, radiopharmaceuticals research and produce that are distributed throughout Brazil, currently the radiopharmaceutical with the largest number of packaged shipped per year and with the highest total activity is the 99m technetium generator. To reduce individual doses for workers involved in the production of radiopharmaceuticals was performed a study of radiological protection optimization in the shipment process of technetium generator, using the techniques: diferencial cost-benefit analysis, integral cost-benefit analysis, multi-attribute utility analysis and multi-criteria outranking analysis. With changes in the configuration of packed for generator dispatch and with the acquirement of a mat transporter it was possible establish 4 protection options. The attributes considered were the protection cost, collective dose, individual dose and physical effort by worker to move the package without the mat. To assess the robustness of analytical solutions found with the techniques used in the optimization we performed a sensitivity study and found that option 3 is more robust than option 1, which is no longer the analytical solution with an increase of R$ 20.000,00 the cost of protection.

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO 7
1.1 Filosofia nacional e internacional com relação as doses recebidas pelos trabalhadores..7
1.2 Decréscimos de doses em outras instalações.....9
1.3 Estado atual da distribuição de dose na produção de radiofármacos 10
1.4 Finalidade e Objetivo.....13

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS 15
2.1 Finalidade do princípio de otimização e restrição de dose.....15
2.2 Técnicas de ajuda para tomada de decisão utilizadas na otimização da proteção.....16
2.2.1 Análise de custo-eficácia.....17
2.2.2 Análise de custo-benefício diferencial.....18
2.2.3 Análise de custo-benefício integral.....19
2.2.4 Análise de custo-benefício expandido.....20
2.2.5 Análise de prioridade com atributos múltiplos.....21
2.2.6 Análise com critérios múltiplos excedentes.....22
2.3 Filosofia e técnicas de monitoramento.....24

3 PARTE EXPERIMENTAL E SOLUÇÕES ANALÍTICAS DO PRESENTE TRABALHO.....27
3.1 Doses que sugerem a aplicação do princípio de otimização.....27
3.2 Estrutura dos embalados de gerador de tecnécio.....29
3.3 Opções de proteção disponíveis e seus custos.....34
3.3.1 Opção 1.....34
3.3.2 Opção 2.....35
3.3.3 Opções 3 e 4.....36
3.4 Determinação da dose coletiva e seu custo.....40

3.5 Atributos e técnicas de ajuda para a tomada de decisão.....41
3.6 Aplicação da técnica de otimização e obtenção da solução analítica.....42
3.6.1 Análise custo-eficácia.....42
3.6.2 Análise custo-benefício.....42
3.6.2.1 Análise custo-benefício diferencial.....43
3.6.2.2 Análise custo-benefício integral.....43
3.6.3 Análise de prioridades com atributos múltiplos.....44
3.6.4 Análise com critérios múltiplos excedentes.....49

4 ESTUDO DE SENSIBILIDADE.....51

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO DOS RESULTADOS.....54

6 TRABALHOS FUTUROS.....57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....58

1. INTRODUÇÃO

1.1 Filosofia nacional e internacional com relação às doses recebidas pelos trabalhadores

Atividades envolvendo radiação ionizante fazem parte do cotidiano de muitas pessoas. O uso dessa tecnologia tem inúmeras aplicações na engenharia, agronomia, indústria e principalmente na medicina nuclear o que traz muitos benefícios à sociedade. Mas esse crescente emprego da radiação ionizante pode trazer um risco potencial à saúde do homem e ao seu meio ambiente, sobretudo se for usada de maneira inadequada.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR, é um dos principais organismos de proteção à radiação ionizante, que fornece recomendações e orientações sobre a proteção e a segurança contra os riscos associados à radiação ionizante, a partir de fontes artificiais e naturais. O Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA, se baseia nas recomendações da CIPR para publicar as suas próprias recomendações de proteção e segurança em sua série de segurança, "Safety Series, SS". No Brasil o órgão que regulamenta e fiscaliza o uso da radiação ionizante é a Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, que se baseia nas publicações da CIPR e do OIEA para estabelecer normas e regulamentos de proteção radiológica.

Em 1959 a CIPR fez sua primeira publicação no formato das séries atuais, Publicação 1, com recomendações adotadas em 1958 [1]. Desde então a CIPR atualiza suas publicações com base em estudos sobre radiação ionizante. Na Publicação 26 [2], de 1977, foram quantificados os riscos de efeitos estocásticos[1] causados pela radiação e proposto um sistema de limitação de dose com três princípios fundamentais de proteção radiológica: da justificativa, da otimização da proteção, e da limitação da dose individual. Na Publicação 60 [3], de 1991 a CIPR revisou suas recomendações e ampliou sua filosofia para um sistema de proteção radiológica, entretanto manteve os princípios fundamentais. O OIEA publicou em 1996 o Safety Series 115 [4] baseado na publicação 60 da CIPR. Em 2007, a

[1] Efeitos estocásticos: efeitos para os quais não existe um limiar de dose para sua ocorrência e cuja probabilidade de ocorrência é uma função da dose. A gravidade desses efeitos é independente da dose.

publicação 60 da CIPR foi substituída formalmente pela publicação 103 [5], onde foram atualizados os fatores de ponderação para a radiação e para tecidos, empregados nas grandezas dose equivalente e dose efetiva e foram revisados os detrimentos causados pela radiação ionizante, baseando-se nas últimas informações científicas disponíveis sobre os conceitos biológicos e físicos da exposição à radiação. Os três princípios fundamentais de proteção radiológica foram mantidos:

1. Princípio da justificativa, que julga e admite a aplicação de uma prática que apresente mais benefícios que detrimento*s*. Nesse princípio nenhuma atividade será adotada a não ser que sua introdução produza um benefício líquido positivo individual e social. Esse processo é necessário não apenas quando uma nova atividade está sendo introduzida, mas também quando uma atividade já existente passa por uma reavaliação.
2. Princípio da otimização, que diminui as doses de radiação tanto quanto racionalmente exequível, levando em consideração fatores sociais e econômicos [6]. É conhecido como princípio ALARA, "As Low As Reasonably Achievable", isto é, tão pequena quanto razoavelmente exequível. Esse princípio deve ser levado em consideração nas três categorias de irradiados, a saber: trabalhadores[2], indivíduos do público e em exposições médicas de pacientes. Na categoria de trabalhadores podemos dividir as doses efetivas individuais anuais recebidas em três regiões: aceitável, tolerável e inaceitável, conforme ilustrado na FIG. 1.1.

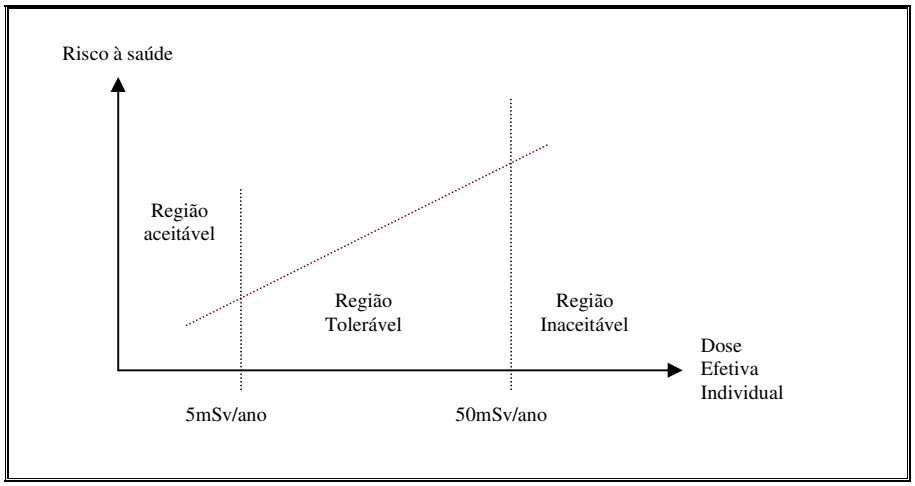


FIGURA. 1.1: Doses efetivas individuais anuais para trabalhadores.

[2] Trabalhador = Indivíduo Ocupacionalmente Exposto

Na região aceitável é admitido que o trabalhador receba uma dose efetiva individual de até 5 mSv/ano, o que corresponde a 1/10 do limite anual. Com uma dose entre 5 e 50 mSv/ano, o trabalhador encontra-se na região tolerável, onde devemos aplicar o princípio ALARA, fazendo melhorias nas condições de proteção radiológica, tanto nos projetos como nos procedimentos, a fim de diminuir as doses recebidas pelos trabalhadores. Com valores de dose acima de 50 mSv/ano, limite anual, o trabalhador está na região inaceitável e portanto proibida [6, 7, 8].

3. Princípio da limitação de dose, que admite o trabalho com radiação desde que se obedeçam aos valores limites de dose de radiação. É estabelecido um limite superior de risco, para o trabalhador e para os indivíduos do público, acima do qual a atividade humana se torna inaceitável. Na publicação 3.01 da CNEN de 2005 [9], o limite anual para o trabalhador é de 20 mSv, média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano, e para o público é de 1 mSv, sendo que a CNEN em situações especiais 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.

1.2 Decréscimos de dose em outras instalações.

No reator IEA-R1 do IPEN, foi realizado um estudo de otimização para definir as espessuras das paredes de duas celas blindadas onde são manipulados materiais irradiados. Foram aplicadas técnicas de ajuda para a tomada de decisão: análise de custo-benefício, análise de custo-benefício expandida e análise de prioridades com atributos múltiplos, resultando em duas soluções ótimas distintas [10].

Em uma instalação de gamagrafia foi realizado um estudo de otimização da proteção radiológica aplicando a técnica de análise de prioridades com atributos múltiplos. Conclui-se que as doses podem ser facilmente reduzidas para a dose efetiva anual otimizada de 5 mSv [11].

A troca dos geradores de vapor em um reator nuclear devido à corrosão dos tubos é uma operação que envolve significativa exposição dos trabalhadores. A Electricité de France, EDF, realizou um processo de otimização das doses individuais e coletivas

recebidas pelos trabalhadores no processo de troca dos geradores de vapor. Com procedimentos como um treinamento intensivo dos trabalhadores, uma preparação detalhada de cada tarefa elementar com um ano de antecedência e com uma previsão de dose recebida em cada tarefa foi possível diminuir a previsão de dose coletiva em um terço [12].

1.3 Estado atual da distribuição de doses dos trabalhadores envolvidos na produção de radiofármacos

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, possui um centro de radiofarmácia, CR, que é uma instalação radiativa que pesquisa e produz radiofármacos para diagnóstico e terapia para todo o país. A produção de radiofármacos do CR vem tendo um aumento desde a década de oitenta, quando ocorreu um crescimento significativo na produção. Pode-se observar esse crescimento no período de 2000 até 2008 na TAB. 1.1 onde temos a quantidade de embalados expedidos e de atividade total dos radiofármacos produzidos e a porcentagem de crescimento da atividade total dos radiofármacos produzidos com relação ao ano anterior.

TABELA 1.1: Número de embalados expedidos e de atividade total dos radiofármacos produzidos no período de 2000 até 2008 e a porcentagem de crescimento da atividade.

Ano	Número de Embalados	Atividade (TBq)	%
2000	27239	446,17	
2001	29654	499,68	11,99
2002	31925	525,23	5,11
2003	34390	565,04	7,58
2004	36265	608,19	7,64
2005	39649	666,19	9,54
2006	41977	716,36	7,53
2007	43441	723,16	0,95
2008	46675	786,03	8,69

Fonte: Sistema de Gestão Integrada da Diretoria de Radiofarmácia (SGI-DIRF) (http://qualidade.ipen.br/Html-cr/cr.html)

Com base no Relatório Anual de Atividades do CR, RAT-CR [13], que é elaborado pela equipe de radioproteção, tem-se na TAB. 1.2 a relação da quantidade de embalados e a atividade total de cada radiofármaco produzido no CR no ano de 2008.

TABELA 1.2 - Quantidade de embalados e a atividade total de cada radiofármaco produzido no CR no ano de 2008.

Produto	Embalados	Atividade (GBq)
FDG - ^{18}F	33	108,48
Hidroxiapatita – HA - ^{90}Y	32	27,01
Acido Fosfórico - ^{32}P	44	92,13
Citrato de Gálio - ^{67}Ga	5.079	2.323,97
Citrato de Ítrio - ^{90}Y	18	13,32
Cloreto de Tálio - ^{201}Tl	1.650	603,04
Cromato de Sódio - ^{51}Cr	102	28,23
Dotatate - ^{I77}Lu	182	1.193,81
Dotatate - ^{131}I	4	1,04
EDTA - ^{51}Cr	106	19,09
EDTMP - ^{153}Sm	206	68,86
Fluordeoxiglucose - ^{18}F	3.833	13.365,90
Fosfato de Sódio - ^{32}P	19	33,93
Gerador de Tecnécio – ^{99m}Tc	15.080	695.822,00
Hidroxiapatita - ^{153}Sm	12	57,35
Hippuran - ^{131}I	12	3,22
Octreotate - DTPA - ^{111}I	416	46,29
Iodeto de Sódio Em Cápsula - ^{131}I	5.558	20.246,30
Iodeto de Sódio - ^{123}I	539	1.258,37
Iodeto de Sódio - ^{131}I	12.421	50.687,30
Lipiodol - ^{131}I	14	32,93
Metaiodobenzilguanidina - ^{131}I	1.071	438,04
Metaiodobenzilguanidina - ^{123}I	227	69,78
Soro Albumina Humana - ^{51}Cr	5	0,19
Soro Albumina Humana - ^{131}I	6	0,22
Sulfato de Sódio - ^{35}S	6	12,62
Total	46.675	786.035,00

Fonte: Relatório da Equipe de Radioproteção do CR.

Como podemos observar na TAB. 1.2, a maior produção de radiofármacos em quantidade de embalados e em atividade total, no ano de 2008, é a do gerador de tecnécio, com 15.080 embalado*s* e 695.822 GBq, que corresponde a 88,5% da produção total. Durante a realização dessas produções ocorre um acúmulo de embalados no setor de expedição, onde são acondicionados para serem retirados pelas transportadoras. Esse acúmulo de material radioativo pode aumentar a dose dos trabalhadores envolvidos no processo de expedição.

Na TAB. 1.3 tem-se a relação de doses recebidas pelos trabalhadores do CR no período de 2000 a 2008. Esses dados foram obtidas dos RAT-CR 2007 e 2008 [13,14].

TABELA 1.3 - Distribuição de doses recebidas pelos trabalhadores do CR no período de 2000 a 2008.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Dose coletiva (pessoa. mSv)	473,99	551,33	446,69	519,90	442,13	411,16	490,59	534,46	588,72
Dose Média (mSv)	7,33	6,45	5,46	4,64	7,96	7,50	6,32	6,35	7,28
Desvio Padrão (mSv)	4,90	3,95	2,86	2,46	4,06	4,03	3,59	4,40	5,08
Trabalhadores Monitorados	129	148	159	171	111	120	142	158	184
Trabalhadores Acima da Dose Média	17	19	17	31	18	18	22	15	16
Trabalhadores Abaixo do Nível de Registro (2,4 mSv /ano)	86	99	117	100	73	81	88	101	133
Trabalhadores Acima do Nível de Investigação (6,0 mSv /ano)	22	22	12	14	25	22	24	16	23
Trabalhadores Acima do Limite Anual Médio (20,0 mSv /ano)	3	1	0	0	0	0	0	1	0
Trabalhadores Acima do Valor de Referência (5 mSv)	27	28	21	29	27	28	28	27	29
% Acima do Valor de Referência	20,93	18,92	13,21	16,96	24,32	23,33	19,72	17,09	15,85

Os valores das doses individuais de exposição à radiação externa foram obtidos com dosímetros termoluminescentes e as estimativas de doses causadas pela exposição interna, foram realizadas em contador de corpo inteiro.

Como pode ser observado na TAB. 1.3, no ano de 2008 cerca de 16% dos trabalhadores estão com doses acima do valor de referência e durante o período de 2000 a 2008 temos uma média de 27 trabalhadores acima deste nível, que é a região onde se deve otimizar as doses dos trabalhadores.

1.4 Finalidade e objetivo

De acordo com a norma CNEN-NN-3.01 "Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica" [9] a demonstração de otimização de um sistema de proteção radiológica é dispensável quando o projeto do sistema assegura que, em condições normais de operação, a dose efetiva anual média para qualquer trabalhador não excede 1 mSv, a dose efetiva anual média para indivíduos do grupo crítico não ultrapasse 10 μSv e a dose efetiva coletiva anual não supere o valor de 1 Sv.pessoa.

Com base no observado nas TAB. 1.2 e TAB. 1.3, esse trabalho tem como finalidade visualizar melhorias no sistema global de proteção radiológica com o intuito de diminuir as doses dos trabalhadores com doses superiores ao nível de investigação e com ênfase para aqueles com doses próximas aos limites de dose anuais médios. Para se alcançar esta finalidade deverão ser conseguidos os seguintes objetivos:

- Efetuar uma análise crítica das atividades executadas no setor de expedição de radiofármacos;
- Efetuar uma análise crítica da distribuição das doses recebidas pelos trabalhadores do setor de expedição de radiofármacos, no período de 2000 a 2008.
- Efetuar um estudo detalhado das possíveis opções de proteção para diminuir as doses recebidas pelos trabalhadores nesse setor;
- Analisar os custos necessários para implementação de opções de proteção;
- Estimar a distribuição de doses dos trabalhadores envolvidos e determinar a dose coletiva em cada opção de proteção;
- Escolher atributos e justificá-los para serem utilizados nas técnicas de ajuda para tomada de decisão;

- Aplicar técnicas de ajuda para tomada de decisão nas opções de proteção e determinar uma solução analítica;
- Avaliar a robustez da solução analítica efetuando estudos de sensibilidade;
- Discutir os resultados obtidos e as propostas para trabalhos futuros que deverão ser realizados principalmente com ênfase para se alcançar a região das doses aceitáveis.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS:

2.1 Finalidade do princípio de otimização e restrição de dose.

No princípio da justificação, a introdução de uma prática que envolva material radioativo deve garantir que haja um benefício líquido positivo. Para isso, deve ser realizada uma análise de custo-benefício para tomada de decisões básicas referente à introdução da prática. Na análise custo beneficio ideal, o beneficio líquido esperado deve ser considerado como:

$$B = V-(P+X+Y) \tag{2.1}$$

Onde:

B = benefício líquido esperado;

V = benefício bruto;

P = custo da produção;

X = custo da proteção;

Y = custo do detrimento relativo às pessoas afetadas pela prática.

Para que a prática seja justificada, o valor do benefício líquido esperado deve ser positivo:

$$B > 0$$

O processo de otimização da proteção deve ser aplicado nas situações de exposição que foram consideradas justificadas. O detrimento originado pela prática deve ser mínimo e o benefício tem que ser máximo. Supondo que o benefício bruto e o custo da produção sejam constantes com relação a dose coletiva, S, teremos B_{max} quando (X+Y) for mínimo, ou seja:

$$B_{máx} = (X+Y)_{min}$$

Para se conseguir o beneficio máximo devem-se introduzir melhorias no sistema de proteção com a consequente diminuição das doses (detrimento). Para tanto, se estabelecem várias opções de proteção e suas consequentes diminuições nas doses coletivas, isto é, a soma de todas as doses recebidas pelos indivíduos expostos à radiação.

Com o uso das técnicas de ajuda para tomada de decisão, que serão apresentadas a seguir, escolhe-se a opção ótima.

É evidente que para uma atividade humana, as diferentes instalações, aplicando em tempos diferentes estas técnicas, reduzirão as doses a valores diferentes. Com a finalidade de apressar os retardatários, isto é, as instalações que ainda estão com as maiores doses individuais, a autoridade competente pode emitir restrições de dose. A restrição de dose tem um valor intermediário, geralmente médio, entre a instalação que tem os menores valores de dose individuais e aquela que tem os maiores valores de dose, dando um prazo para que todas as instalações que possuem valores acima das restrições de dose obedeçam ao novo limite [15].

Porém uma publicação recente da CIPR [5] reformulou o significado da restrição de dose, informando que, quando ela for emitida pela autoridade competente do país, todas as instalações envolvidas por esta restrição deverão obrigatoriamente efetuar uma otimização e a opção de proteção mais barata, conhecida como opção básica, já deve obedecer à restrição de dose.

2.2 Técnicas de ajuda para tomada de decisão, utilizadas na otimização da proteção.

Após identificar as possíveis opções e quantificar os atributos associados a cada opção, podemos comparar o desempenho das diferentes opções, descartando aquelas que não são apropriadas. As primeiras a serem descartadas são as que não satisfazem os atributos estabelecidos ou os requisitos de projetos. Para decisões simples, uma comparação intuitiva baseada no conhecimento pode ser suficiente. Porém, quando a solução ótima não está evidente, ou quando tem que ser explicada ou justificada, pode ser necessário o emprego de técnicas de ajuda para tomada de decisão. [8]

Na publicação 55 da CIPR [8], são apresentadas as técnicas mais comumente usadas:

- Análise de Custo-Eficácia;
- Análise de Custo-benefício Diferencial;
- Análise de Custo-benefício Integral;
- Análise de Custo-benefício Expandida;
- Análise de Atributos Múltiplos;
- Análise de Critérios Múltiplos Excedentes.

A escolha da técnica dependerá da complexidade dos atributos e critérios envolvidos nas opções selecionadas. E a solução ótima também dependerá dos atributos a ela incorporados e não da escolha da técnica.

2.2.1 Análise de custo-eficácia

A Análise de Custo-Eficácia é uma técnica simples que possibilita eliminar as opções que tem doses e custos maiores que as outras. Pode ser usada junto com outra técnica, previamente para uma análise mais detalhada na investigação das opções.

Uma maneira simples de investigar as opções que podem ser eliminadas é através de um gráfico de custos de proteção, X, versus a dose coletiva, S_i, para cada opção *i*. Na FIG. 2.1 tem-se um exemplo de 24 opções de proteção e suas respectivas doses coletivas.

Com a análise de custo-eficácia são eliminadas as opções acima da curva. Como pode-se observar, as opções são reduzidas significativamente. Essa técnica possibilita uma avaliação prévia das opções, deixando o sistema um pouco mais simples para a aplicação de outras técnicas.

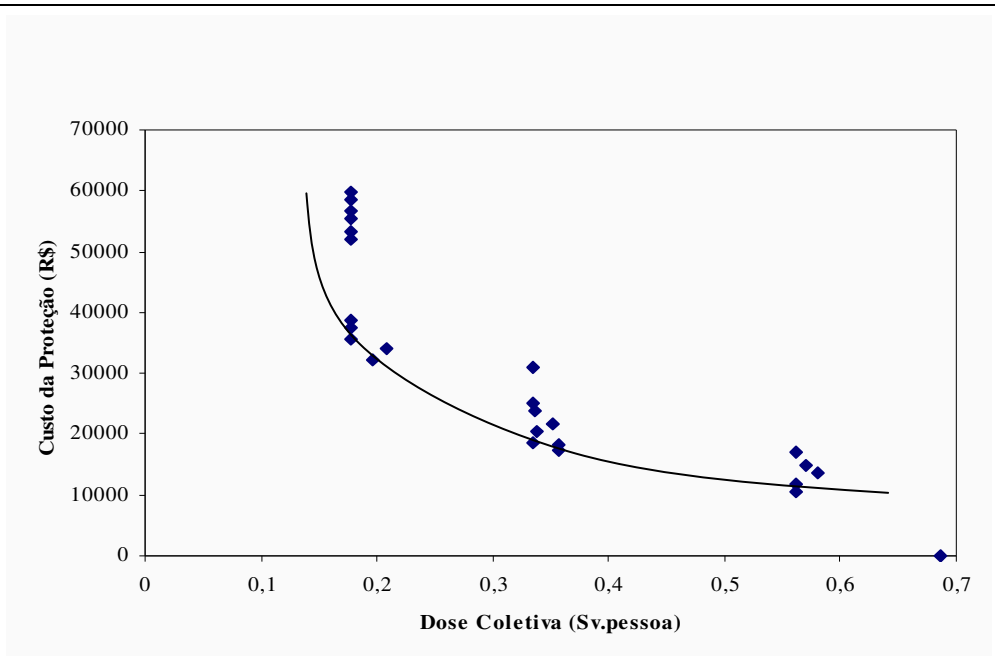


FIGURA 2.1: Custo da produção versus dose coletiva

A aplicação de outras técnicas se faz necessária tendo em vista que a análise de custo eficácia não corresponde a uma otimização da proteção, uma vez que não engloba as concessões recíprocas fundamentais entre custo de proteção e dose coletiva.

2.2.2 Análise de custo-benefício diferencial

Na análise de custo-benefício diferencial são considerados apenas dois atributos: o custo da proteção (X) e a dose coletiva (S). O custo da proteção e custo do detrimento (Y) são dependentes da dose coletiva. Portando, derivando a equação 2.1 em função de S e igualando a zero a expressão, temos:

$$\frac{dB}{dS} = -\left(-\frac{dV}{dS} + \frac{dP}{dS} + \frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} \right) = 0 \tag{2.2}$$

Sendo o benefício bruto, V, e o custo da produção, P, constantes com relação a S, temos:

$$-\left(+\frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} \right) = 0$$

$$\frac{dX}{dS} = -\frac{dY}{dS} \tag{2.3}$$

Assim, temos que o benefício máximo é obtido quando um aumento no custo da proteção por unidade de dose coletiva corresponde à diminuição do custo do detrimento por unidade de dose coletiva. Partindo da proposta da CIPR, de que existe uma linearidade na relação entre dose e efeito biológico, portanto uma relação linear entre o detrimento na saúde e a dose coletiva, pode-se escrever:

$$\frac{dX}{dS} = -\frac{dY}{dS} = \alpha \text{ (constante)} \tag{2.4}$$

Onde α (alfa) representa o custo do detrimento por unidade de dose coletiva, calculada, geralmente, a partir do Produto Interno Bruto (PIB) de cada país. Na verdade, α é o valor monetário fornecido para concretizar o detrimento à saúde, por unidade de dose coletiva, e é estabelecido pela autoridade competente do país. No Brasil, α equivale, em unidades monetárias nacionais, a US$ 10.000/Sv.pessoa [9]. A CNEN adotou esse valor seguindo a sugestão da CIPR, que diz que países que não tenham determinado seu próprio

valor, que adotem o valor médio do intervalo de variação entre US$ 1.000/Sv.pessoa e US$ 25.000/Sv.pessoa, existentes em diferentes países [7].

Esse método compara o aumento do custo de proteção com a conseqüente redução na dose coletiva. Essa comparação, geralmente, é efetuada usando a razão custo-eficácia, que é expressa em termos monetários, R$ por Sv.pessoa. A solução analítica é aquela que apresenta a relação custo eficácia mais próxima do valor α, sempre que factível inferior a esse valor.

2.2.3 Análise de custo-benefício integral

Na análise de custo-benefício uma característica importante é que os atributos que influenciam a decisão são expressos em termos monetários. A formulação mais simples é baseada somente no custo da implementação da proteção e os níveis de dose coletiva associada. Os dois atributos são expressos nos mesmos termos, de tal maneira que o valor ótimo é dado pelo valor mínimo da soma agregada desses termos.

Uma maneira simples para expressar o detrimento em termos monetários é a multiplicação da dose coletiva, para cada opção, por um valor de referência para unidade de dose coletiva, valor α.

Partindo da equação 2.4, temos:

$$dY = \alpha \, dS \tag{2.5}$$

Integrando a equação 2.5:

$$\int dY = \alpha \int dS$$

$$Y = \alpha S + C \tag{2.6}$$

Quando a dose coletiva for nula o detrimento e a constante C também serão nulos, portanto podemos escrever:

$$Y = \alpha S \tag{2.7}$$

Nessa técnica, como na análise custo-benefício diferencial, a solução ótima é a que tem o valor de $(X+\alpha S)$ mínimo.

2.2.4 Análise de custo-benefício expandido

Um atributo importante na proteção radiológica é a dose individual, se são grandes ou pequenas com relação aos limites de dose. Na análise de custo-benefício expandida esse atributo pode ser levado em consideração. Para incorporar outros atributos à análise, é necessário adicionar outros componentes de detrimento para o custo total existentes. Podemos incluir níveis de dose individual como uma componente adicional ao custo, usando o termo β (beta), isso pode ser expresso como:

$$Y = \alpha S + \sum_j \beta_j N_j f_j(H_j) \qquad (2.8)$$

Onde,

Y = custo do detrimento total;

S = dose coletiva originada;

α = valor de referência para dose coletiva unitária;

β_j = valor adicional dado à dose coletiva unitária para o grupo *j*;

N_j = número de indivíduos expostos no grupo j;

$f_j(H_j)$ = função do nível de dose individual do grupo *j*.

Uma maneira simples de determinar o termo $f_j(H_j)$ é separar em termos de intervalo de dose individual, para os quais corresponderá um valor β, como por exemplo:

TABELA 2.1- Exemplo de intervalos de doses e valores β associados.

Intervalo de dose (mSv)	Índice beta	Valor monetário de beta (R$ por Sv.pessoa)
$0 < H < 5$	β_1	0
$5 \leq H < 15$	β_2	40000
$15 \leq H \leq 50$	β_3	80000

O custo do detrimento será:

$$Y = \alpha S + \beta_1 S_1 + \beta_2 S_2 + \beta_3 S_3 \qquad (2.9)$$

O custo ampliado total (X + Y) será igual a:

$$X + \alpha S + (\beta_1 S_1 + \beta_2 S_2 + \beta_3 S_3) \qquad (2.10)$$

Onde,

X = custo para implementar a opção;

S = dose coletiva associada com a opção, α é o valor monetário de referência para a dose coletiva unitária;

S_1; S_2; $S_{,3}$ = é a parte da dose coletiva correspondente aos três intervalos de dose individual para cada opção.

Na técnica de custo beneficio expandido, a solução analítica é a opção que possui o menor valor do custo ampliado total (X + Y).

Essa técnica é adequada quando são incorporadas uma ou duas extensões. Para uma quantidade maior de atributos a CIPR sugere o uso de outras técnicas.

2.2.5 Análise de prioridades com atributos múltiplos

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

Nessa 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.

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*. Para o atributo que conduz às consequências menos adversas é atribuída uma prioridade $u_j = 1$, e para o atributo que conduz às conseqüências piores é atribuído $u_j = 0$.

A partir das funções de prioridades simples, u_j, expressando as várias prioridades dos *n* atributos associados à 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 prioridade total pode ser expressada como segue:

$$U_i = \sum_{j=1}^{n} k_j u_j \tag{2.11}$$

Onde,

n = número de atributos;

U_i = função prioridade total;

kj = constante de crescimento, fornece a importância relativa de cada atributo *j*;

u_j = função de prioridade parcial para cada atributo j.

As constantes de crescimento podem ser conseguidas de duas maneiras, a saber: 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, α R(S), onde R(S) é o intervalo de doses coletivas e assim para os demais atributos. É uma técnica muito parcial, pois relaciona a importância dos atributos de acordo com o seu intervalo de variação.

Na avaliação por razões de substituição, os atributos pertinentes são colocados em ordem decrescente de importância e em seguida é atribuída a importância relativa a cada atributo em relação ao atributo mais importante.

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

$$\sum k_j = 1$$

Na análise de atributos múltiplos a solução analítica é dada pela opção que torna a função prioridade total, U, máxima.

2.2.6 Análise com critérios múltiplos excedentes

As técnicas vistas até agora dependem de atributos mensuráveis, como a dose coletiva, e o desempenho inadequado de um atributo é compensado pelo melhor desempenho de outros atributos. A dificuldade nessas técnicas é quando surgem atributos que são muito heterogêneos ou quando só podem ser avaliados de maneira qualitativa.

Em um processo de otimização, podem ser importantes atributos como a aceitação pública da prática a ser instalada. Nesses casos é mais adequado o uso da análise de critérios múltiplos excedentes, onde cada opção i é comparada com as demais m,

avaliando se a opção i excede (ou é preferível) à opção m. Essa comparação por pares está baseada em dois indicadores, 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 à 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 kj:

$$Ad_{i,m} = \sum_{j} k_j \, a_j$$

Onde:
aj = indicador de vantagem para o atributo j e aj = 1 se a opção i for melhor do que a opção m para o atributo j, caso contrário aj = 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 da m são muito grandes: $Ec_{i,m} = 1$
   - Quando os prejuízos associados à escolha da opção i em vez da 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 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 tornado o processo de análise mais claro.

A CIPR não recomenda o uso de nenhuma técnica em particular, mas acredita que a maioria das situações não exigirá uma técnica mais complexa que a análise de custo-benefício integral ou expandida.

2.3 Filosofia e técnicas de monitoramento.

A finalidade do monitoramento é avaliar e estimar as exposições às radiações ionizantes, internas e externas, nos indivíduos. É justificado pelo auxilio na obtenção e demonstração de um grau adequado de proteção. Dentro de um programa de proteção radiológica, um programa de monitoramento permite comprovar que os limites de dose estão sendo obedecidos, confirmar os resultados previstos nos processos de otimização e classificar as áreas de trabalho [15, 16, 17, 18].

Os objetivos de um projeto de programa de monitoramento devem ser claramente definidos e registrados. Com base nos objetivos, o monitoramento, quanto às suas funções, pode ser dividido em três categorias, a saber:

- Monitoramento de rotina: está relacionado a operações que são realizadas rotineiramente nas atividades da instalação. É importante para demonstrar que as condições de trabalho permanecem satisfatórias, inclusive os valores de doses individuais.
- Monitoramento relacionado com a tarefa: aplicado a uma operação específica. É importante para evitar, detectar e tomar as primeiras medidas em caso de incidente. É feita pelo próprio trabalhador e auxilia no processo de otimização da proteção.
- Monitoramento especial: é de natureza investigatória, ele envolve uma situação no local de trabalho onde as informações não são suficientes para demonstrar um controle adequado. É idealizado para fornecer informações detalhadas de situações no local de trabalho, que possam ajudar a esclarecer qualquer problema e definir procedimentos futuros. Em situações normais é introduzido para resolver problemas e após a sua solução é eliminado. Exemplo: se for previsto que um grupo de trabalhadores pode apresentar doses próximas ou um pouco acima ao limiar de dose, que exige o uso de dosímetros individuais para a exposição externa, pode-se fornecer dosímetros individuais por um determinado tempo que permita investigar o problema para solucioná-lo. Em situações acidentais de trabalho ele é

introduzido com a finalidade de se voltar à normalidade e é eliminado quando isso ocorrer.

O monitoramento está relacionado com a sua localização e é dividido em dois tipos:

· Monitoramento de local de trabalho, que envolve medidas realizadas no ambiente de trabalho, sendo subdivido para a radiação externa, a contaminação de superfície e a contaminação do ar.

· Monitoramento individual, onde são obtidas medidas: por um equipamento portado pelo trabalhador ou das quantidades de material radioativo presente interna e/ou externa ao corpo. Esse monitoramento é subdividido para a exposição externa, a contaminação de pele e roupa e a exposição interna.

Em resumo são seis tipos de monitoramento, três relacionados com o local de trabalho e três individuais:

a) Monitoramento do local de trabalho para radiação externa: tem como finalidade garantir a existência de condições satisfatórias de trabalho analisando o controle das exposições às radiações externas. Bem como mostrar que o ambiente de trabalho é satisfatório para a radiação externa e que não sofreu mudanças que possam exigir uma reavaliação dos procedimentos de operação.

b) Monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície: tem como finalidade demonstrar que a contenção primária de material radioativo tem um padrão elevado de segurança e de controle gerencial e mostrar que há ausência de contaminação próxima de um determinado valor de referência.

c) Monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar: tem como finalidade manter os valores de contaminação do ar no ambiente de um local de trabalho inferiores aos padrões de proteção e níveis de referência, visando evitar o monitoramento individual interno.

d) Monitoramento individual para radiação externa e interna: tem como finalidade obter uma avaliação da dose efetiva e, onde for adequada, a dose equivalente em tecidos expostos; contribuir para o controle de operações e para o projeto da instalação e no caso de sobrexposição em acidentes, fornecer informações importantes para o tratamento de saúde adequado.

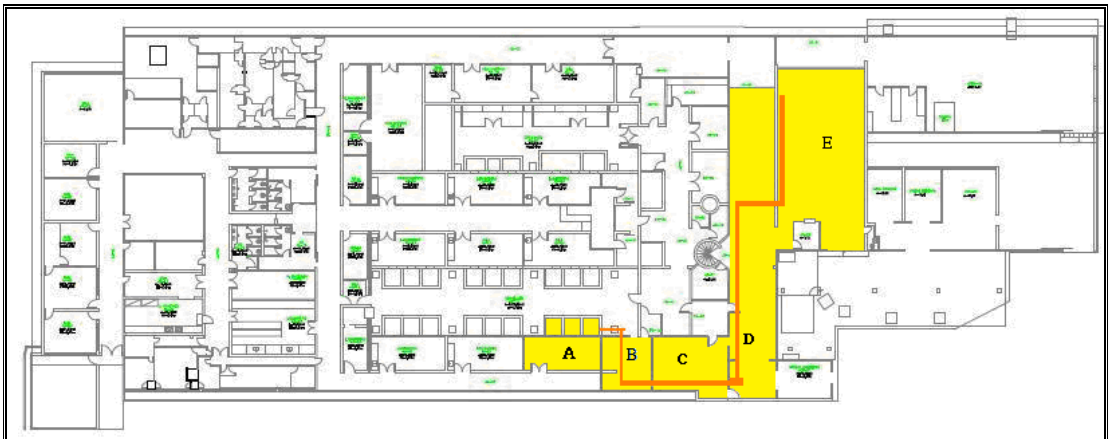
e) Monitoramento individual para contaminação de pele e roupa: tem como principais objetivos demonstrar concordância com os limites pertinentes, detectar a

contaminação que poderia ser transferida para fora de uma área controlada e em caso de sobrexposição acidental, fornecer informações importantes para um auxilio médico apropriado.

3. PARTE EXPERIMENTAL E SOLUÇÕES ANALÍTICAS DO PRESENTE TRABALHO.

3.1 Doses que sugerem a aplicação do princípio de otimização.

Como pode-se observar na TAB. 1.2 o gerador de tecnécio é o responsável por 88,5% de toda a atividade produzida. Em 2008 foi realizado um estudo das doses individuais recebidas pelos trabalhadores envolvidos desde as fases de montagem do gerador até a expedição do embalado que contém o gerador [19]. Uma fase que merece atenção com relação às doses individuais é a expedição dos embalados. Nessa fase os embalados chegam da linha de produção por um teleférico, de onde são retirados e armazenados à espera de que sejam levados pelas transportadoras. Nessa fase da produção estão envolvidos de 2 trabalhadores. Na FIG 3.1 temos a planta do CR, destacando as etapas da montagem do gerador de tecnécio.



Legenda:
A – Manipulação e fracionamento de molibdênio nas celas de produção.
B – Retirada do molibdênio da cela de produção e adequação para serem embalados.
C – Embalagem do molibdênio e monitoramento do embalado.
D - Lacração do embalado e disposição no teleférico para locomoção.
E - Retirada dos embalados do teleférico e armazenamento provisório.
▬ - Representa o percurso do material radioativo.

FIGURA 3.1 - Planta do CR com as etapas onde ocorre a montagem do gerador de tecnécio.

No relatório anual de atividades do CR de 2008, RAT-CR [13], elaborado pela Equipe de Radioproteção, ERP, local, tem-se as doses efetivas individuais anuais dos trabalhadores que estão com dose acima de 5 mSv. Dos 29 trabalhadores que receberam doses acima de 5 mSv em 2008, 7 são trabalhadores que se revezam na retirada dos embalados do teleférico. Na TAB. 3.1 tem-se as doses efetivais anuais individuais desses trabalhadores nos últimos 3 anos.

TABELA 3.1- Dose efetiva anual individual de 7 trabalhadores do setor de expedição do CR nos últimos 3 anos.

Trabalhador	**Dose Efetiva Anual Individual – mSv**		
	2006	**2007**	**2008**
T1	11,26	22,37	19,30
T2	2,69	3,27	5,69
T3	5,22	12,03	19,93
T4	6,08	5,01	5,84
T5	13,65	9,09	13,59
T6	7,45	13,43	9,23
T7	11,13	14,16	14,67

Para avaliar as doses individuais recebidas por esses trabalhadores foram consideradas as doses recebidas durante cinco produções características do primeiro semestre de 2008. A produção do gerador de tecnécio é semanal. Para isso foram entregues dosímetros semicondutores de leitura instantânea aos trabalhadores que realizam essas tarefas no início da produção e recolhidos no final. Na TAB.3.2 estão descritos os valores de dose individual recebidos pelos trabalhadores durante a retirada dos embalados do teleférico e seu armazenamento até serem retirados pelas transportadoras.

TABELA 3.2 - Doses individuais recebidas pelos trabalhadores que retiram os embalados do teleférico, durante cinco produções no primeiro semestre de 2008.

Data	Atividade Total (TBq)	Trabalhador	Dose (μSv)
29/02/08	13,48	T7	165
		T5	165
06/03/08	13,94	T7	143
		T1	242
20/03/08	14,01	T7	209
		T3	308
28/03/08	13,62	T7	143
		T5	176
25/04/08	13,55	T6	242
		T7	198
		T2	275

A dose efetiva individual média desses trabalhadores é de 206,00 ± 54,80 μSv, considerando que cada trabalhador possui 6 semanas de férias, que são de 40 dias divididas em dois, uma a cada 6 meses, a dose individual anual média será de 8,65 ± 2,30 mSv. Com esse valor de dose devem ser feitas melhorias nas condições de proteção, tanto nos projetos como nos procedimentos para diminuírem as doses na realização dessa tarefa.

3.2 Estrutura dos embalados de gerador de tecnécio

A coluna[3] dentro de uma blindagem de chumbo, que contém o molibdênio, é acondicionada em um recipiente para gerador, RPG, e esse recipiente é colocado dentro de uma embalagem para despacho de gerador, EDG. Na FIG. 3.2, tem-se representados os recipientes que acondicionam o molibdênio.

[3] Coluna: tubo de vidro vertical tampado e preenchido com material adsorvedor, onde é realizada uma separação entre elementos químicos. Sua tampa é vazada por dois pequenos tubos finos de aço: um para entrada e outro para saída, onde se coloca um vidro com vácuo para puxar o elemento químico de interesse [20].

(a) Coluna dentro de uma blindagem de chumbo

(b) RPG

(C) EDG

FIGURA 3.2 - Recipientes para acondicionamento do Gerador de ^{99}Mo/ ^{99m} Tc.

No primeiro semestre de 2008 os EDGs eram constituídos basicamente de polipropileno (PP), polipropileno expandido, com cilindro de chumbo de 6 mm e de 8 mm que eram colocados dentro da embalagem dependendo da atividade do material, sendo:

· De 9,25 GBq a 27,75 GBq - sem cilindro adicional.

· De 37,00 GBq a 46,25 GBq - com cilindro de chumbo de 6 mm (Blindagem I).

· De 55,50 GBq a 74,00 GBq - com cilindro de chumbo de 8mm (Blindagem II).

Na FIG. 3.3, temos um desenho esquemático da embalagem utilizada no primeiro semestre de 2008, o EDG 1.

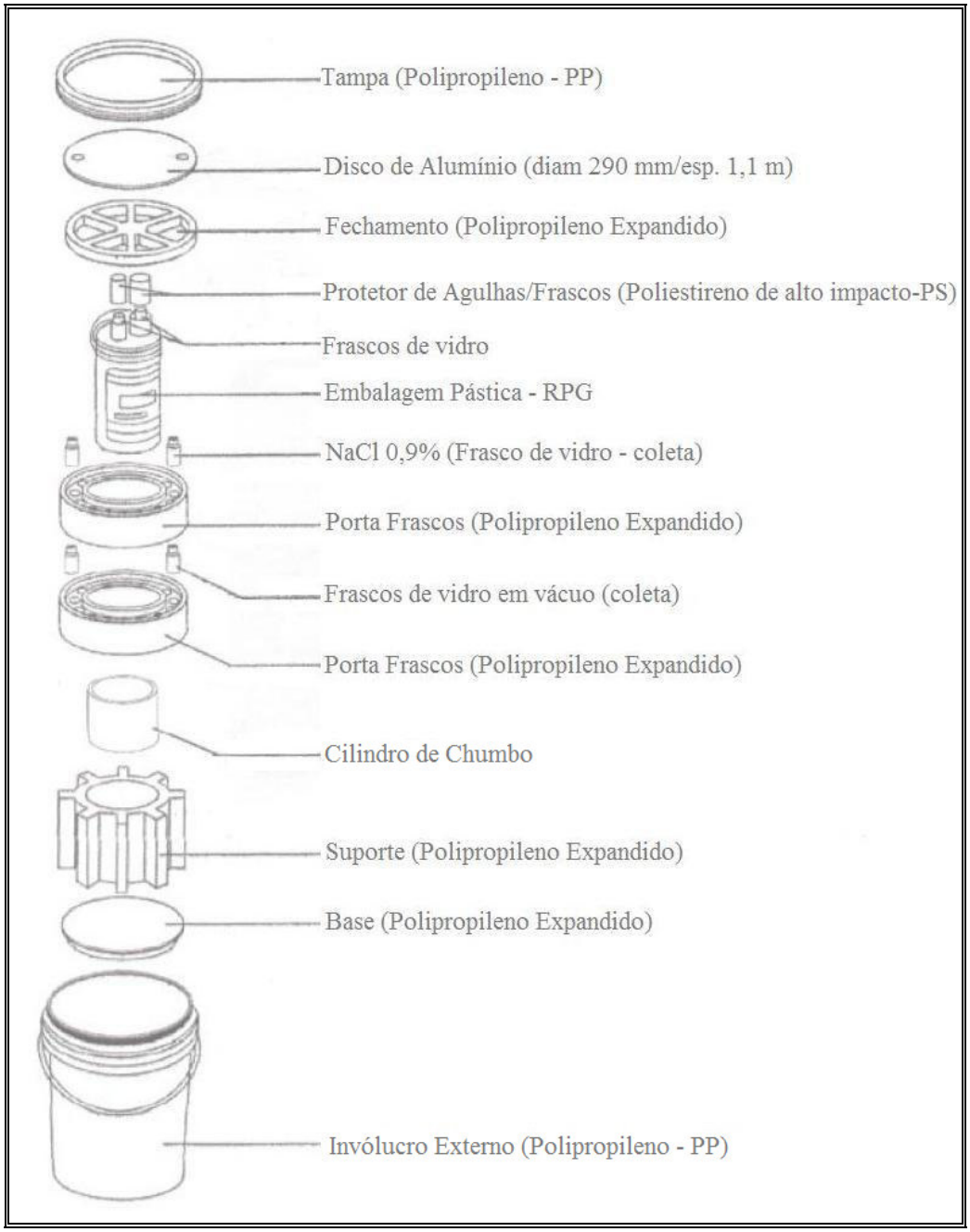


FIGURA 3.3 - Desenho esquemático dos embalados de gerador de tecnécio usado no primeiro semestre de 2008.

A partir do segundo semestre de 2008 foi adquirido um novo tipo de embalagem para despacho de gerador, o EDG 2, quando todas as embalagens passaram a ter um cilindro de chumbo de 8 mm, interno ao invólucro externo, independente da atividade do molibdênio. Na FIG. 3.4 tem-se uma foto desse embalado:

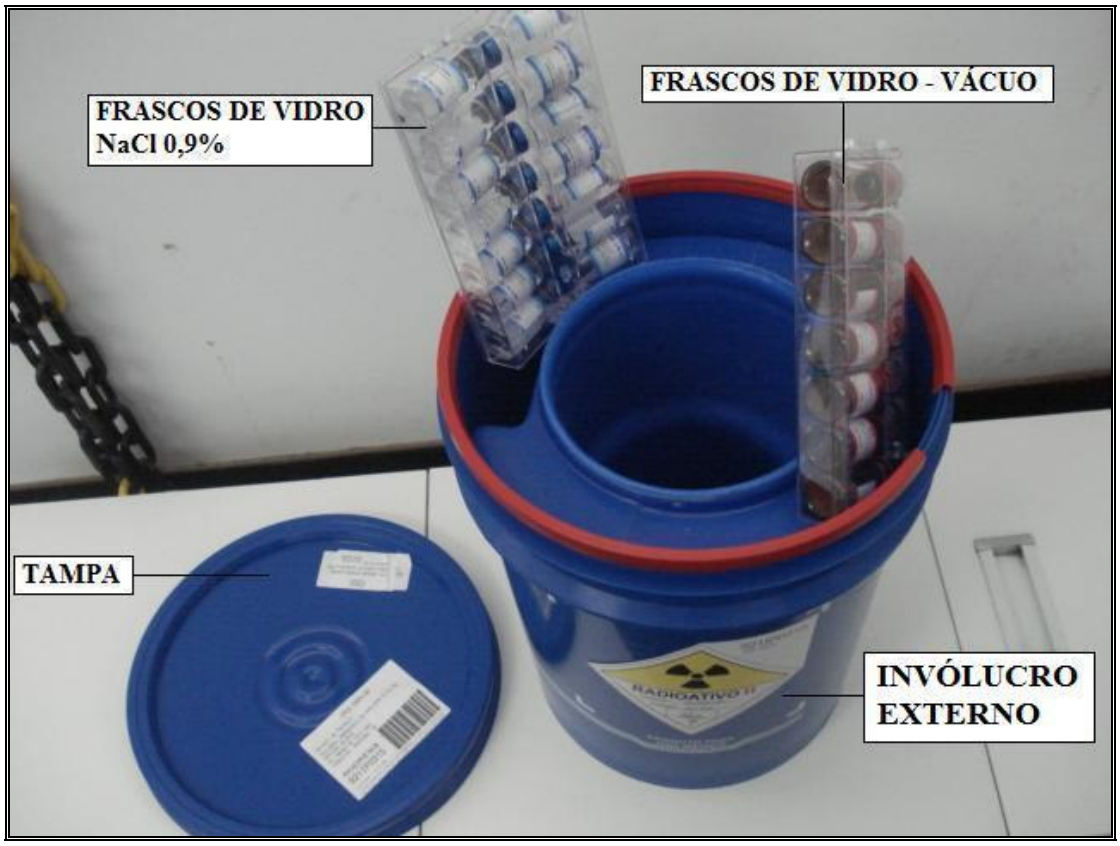


FIGURA 3.4 – EDG 2 usado a partir do segundo semestre de 2008.

Na FIG. 3.5, tem-se um desenho esquemático da embalagem utilizada a partir do segundo semestre de 2008, o EDG 2.

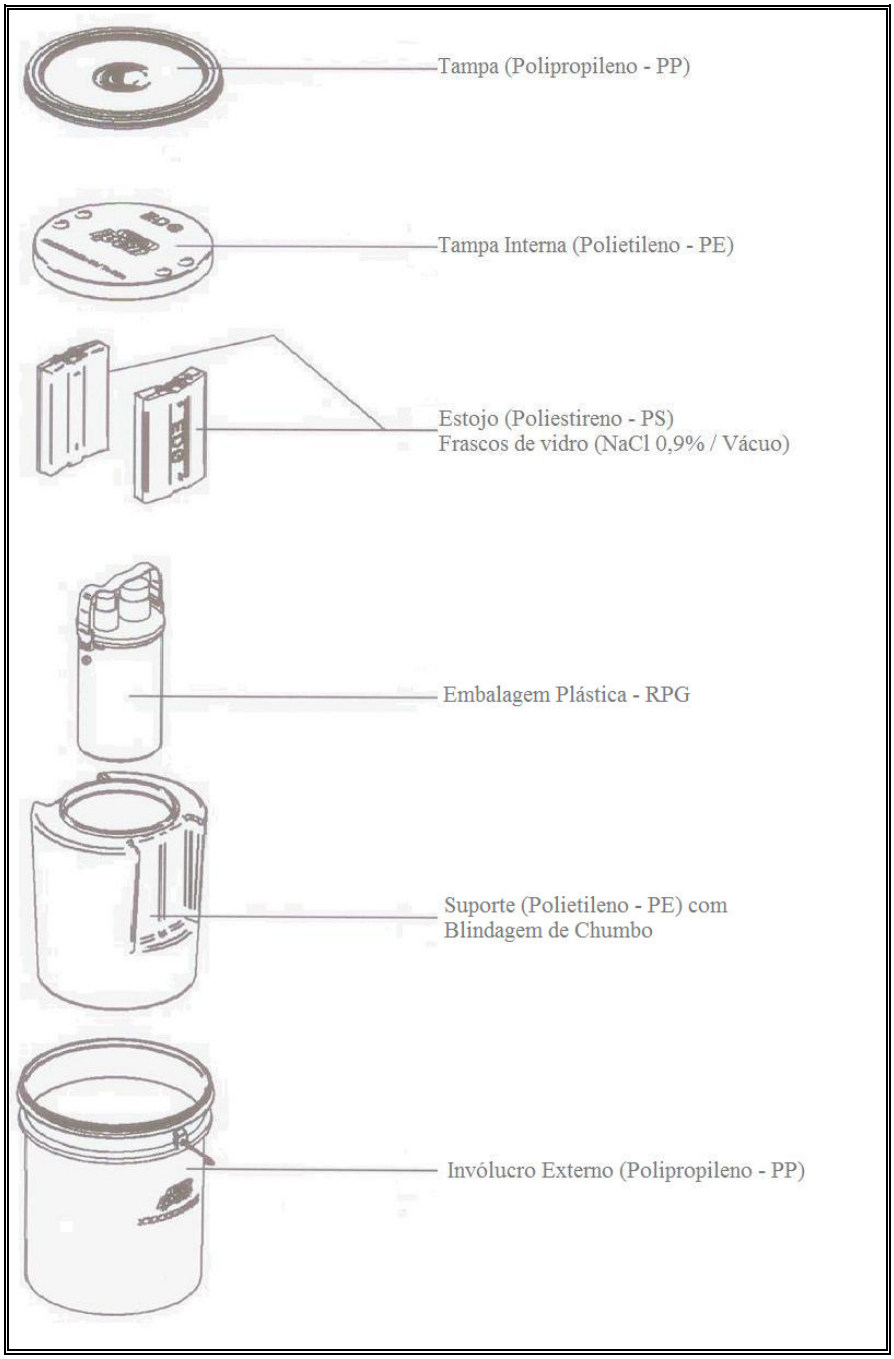


FIGURA 3.5 - Desenho esquemático dos embalados de gerador de tecnécio usado a partir do segundo semestre de 2008.

No primeiro semestre de 2009, foram realizadas novas medidas das doses individuais nas mesmas tarefas que em 2008, quando o EDG 2 já estava sendo usado. Essas doses estão descritas na TAB. 3.3:

TABELA 3.3 - Doses individuais recebidas pelos trabalhadores que retiram o embalado do teleférico, durante cinco produções representativas no primeiro semestre de 2009.

Data	Atividade (TBq)	Trabalhador	Dose (μSv)
20/03/09	14,11	T4	242
		T6	187
03/04/09	13,81	T5	132
		T1	187
24/04/09	14,55	T7	154
		T8	187
08/05/09	14,25	T1	264
15/05/09	14,31	T7	176
		T1	264

Analisando as doses individuais dos trabalhadores após a implementação do EDG 2 a dose individual média passou a ser de 199,22 ± 47,30 μSv e a dose individual anual média será de 8,37 ± 1,98 mSv/ano, novamente, considerando-se as férias. A diminuição das doses foi de cerca de 6%, mas elas continuam na região do tolerável, onde deve ser aplicado o princípio ALARA.

3.3 Opções de proteção disponíveis e seus custos.

3.3.1 Opção 1

Nessa opção as embalagens EDG 1, recebem blindagens de chumbo de diferentes espessuras para geradores com atividade acima de 37 GBq. Para comparar esta opção com as demais, foi realizado um estudo da distribuição das atividades do gerador de tecnécio durante o ano de 2008. Na TAB. 3.4 tem-se as quantidades de embalado*s* por cada intervalo de atividade:

TABELA 3.4 - Quantidade de embalado*s* produzidos em 2008 distribuídos por atividade.

Atividade	Quantidade de Embalado*s*
9,25 - 27,75 GBq	3.773
37,00 - 46,25 GBq	4.405
55,50 - 74,00 GBq	6.902
Total	15.080

Segundo o Departamento de Gestão de Suprimentos do CR o custo do EDG 1 é de R$ 72,75, mais R$ 60,00 para o cilindro de 6 mm ou mais R$ 120,00 para o cilindro de 8 mm, EDG 2. Segundo informações obtidas junto aos trabalhadores do setor, a vida média desses cilindros de chumbo é estimada em 20 anos. Na TAB. 3.5 tem-se os dados referente à opção 1:

TABELA 3.5 - Dados referente à opção 1.

Opção 1	Sem Blindagem	Blindagem I	Blindagem II
Custo por embalagem (R$)	72,75	132,75	192,75
Vida média da embalagem (anos)	20	20	20
Custo por ano (R$/ano)	3,34	6,64	9,64
Quantidade de embalado*s*	3.773	4.405	6.902
Custo anual parcial da proteção (R$)	13.724,29	29.238,19	66.518,03
Custo anual da proteção (R$)			110.000,00

O custo anual da proteção na opção 1 é a soma dos embalados sem blindagem e com blindagens I e II, que é aproximadamente R$ 110.000,00.

3.3.2 Opção 2

Na opção 2, as embalagens passaram a ter a mesma blindagem, um cilindro de chumbo de 8 mm para qualquer atividade. Devido ao novo formato do EDG 2, o CR conseguiu que eles tivessem o valor inferior ao EDG 2 usando um cilindro com 8 mm de chumbo. Na TAB. 3.6 estão os dados referentes a opção 2:

TABELA 3.6 - Dados referentes à opção 2:

Opção 2	
Custo por embalagem (R$)	162,00
Vida média da embalagem (anos)	20
Custo por ano (R$/ano)	8,20
Quantidade de embalados	15.080
Custo anual da proteção (R$)	122.000,00

3.3.3 Opções 3 e 4

As opções 3 e 4 são mais complexas que as opções anteriores, pois utilizam uma esteira rolante e automática, que lacra, transporta e acondiciona o embalado.

A utilização dessa esteira rolante possibilitará a eliminação de 2 tarefas que envolvem de 3 trabalhadores. Uma dessas tarefas é a retirada do embalado do teleférico e a acomodação para que sejam retirados pelas transportadoras. Na FIG. 3.6 tem-se a descrição do prédio 1 do CR, com um traço laranja representando o teleférico que está instalado atualmente e seis fases do embalado no percurso do teleférico representados por fotografias.

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

Legenda:

▬ - Representa o percurso do material radioativo.

(1) - Lacração e colocação do embalado no teleférico.

(2) e (3) - Transporte de embalados pelo teleférico.

(4) e (5) - Chegada de embalados para serem expedidos.

(6) - Retirada dos embalados da esteira teleférica e acondicionamento para serem expedidos

FIGURA. 3.6 – Descrição do percurso do embalado após ser lacrado e colocado no teleférico com seis pontos representados por fotografias que ilustram o percurso do embalado no teleférico.

Na esteira rolante, os embalado*s*, após serem lacrados continuarão seguindo na esteira que se ligará a mais 10 esteiras que terminarão em posições de carregamento das diferentes transportadoras. Portanto o trabalhador da posição 1, que coloca os embalados no teleférico após serem lacrados e os trabalhadores da posição 6, que retiram o embalado do mesmo para armazenagem, FIG 3.6, serão realocados para outras funções já que a esteira rolante é automática e dispensa essas tarefas. Na FIG. 3.7, temos a descrição do percurso da esteira rolante:

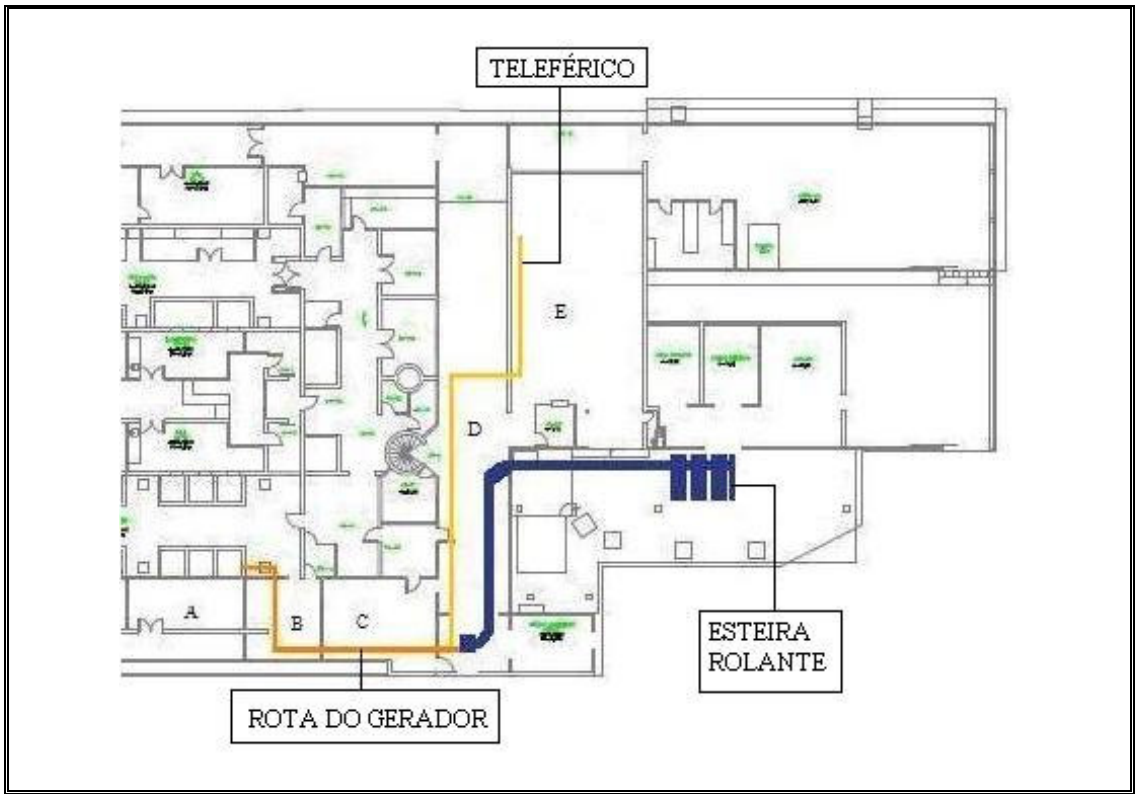


FIGURA 3.7: Desenho esquemático demonstrando a rota do gerador de tecnécio e a esteira rolante que substituirá o teleférico.

Na FIG. 3.8, tem-se fotografias que representam os pontos numerados de 1 a 6 identificando o percurso do material radioativo na esteira rolante.

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

Legenda:

(1) - Entrada dos embalado*s* na esteira rolante, após serem lacrados.

(2) - Elevador que carrega os embalado*s* para a parte superior da esteira rolante.

(3) - Parte superior da esteira rolante.

(4) - Parte superior da esteira rolante ligada ao elevador que carrega os embalado*s* para a parte inferior da esteira.

(5) - Esteira com sensor de leitura óptica que seleciona em qual das 10 esteiras, será acondicionado o embalado.

(6) - Trabalhador da transportadora retirando os embalado*s* armazenados para transporte.

FIGURA 3.8 – Fotografias que identificam o caminho percorrido pelo embalado na esteira rolante.

Na opção 3 será considerada a instalação da esteira rolante com a utilização do EDG 1 e a opção 4 será considerada a instalação da esteira rolante com a utilização do

EDG 2. Na TAB. 3.7 estão descritos os dados referentes à opção 3 e na TAB. 3.8 estão descritos os dados referentes a opção 4:

TABELA 3.7- Dados referentes a opção 3:

Opção 3	
*Custo da esteira rolante (R$)	400.000,00
Vida média da esteira rolante (anos)	20
Custo por ano (R$/ano)	20.000,00
Custo anual dos embalado*s* EDG 1 (R$)	110.000,00
Custo anual total (R$)	130.000,00

* Fonte: Departamento de Gestão de Suprimentos do CR

TABELA 3.8- Dados referentes a opção 4:

Opção 4	
Custo da esteira rolante (R$)	400.000,00
Vida média da esteira rolante (anos)	20
Custo por ano (R$/ano)	20.000,00
Custo anual dos embalado*s* EDG 2 (R$)	122.000,00
Custo anual total (R$)	142.000,00

3.4 Determinação da dose coletiva e seu custo

Para a determinação da dose coletiva na opção 1, usa-se a dose individual média 206,00 ± 54,80 μSv resultante das doses coletadas no primeiro semestre de 2008, quando era utilizado o EDG 1. Na retirada dos embalados do teleférico, realizam as tarefas dois trabalhadores, portando a dose coletiva média é 412 ± 109,60 μSv por produção e a dose coletiva anual é 17,304 mSv.

Na opção 2, foi utilizada a dose individual média 199,22 ± 47,30 μSv resultante das doses coletadas no primeiro semestre de 2009, quando já haviam introduzido os EDG 2. A dose coletiva por produção passou a ser 398,44 ± 81,40 μSv e a dose coletiva anual 16,734 mSv.

Nas opções 3 e 4, uma das tarefas que serão eliminadas é a inserção dos embalados no teleférico e a outra é sua retirada, portando a dose coletiva passará a ser zero para a expedição do embalado. Na TAB. 3.9, tem-se um resumo dos custos da proteção, as doses coletivas, as doses individuais e o esforço físico de cada opção. Para esse último foi considerado que ele variaria linearmente com as espessuras exigidas em cada opção, devidamente ponderadas quando existe mais de uma blindagem no caso da opção1. A ponderação foi realizada com relação ao número de embalado*s* a mais, a saber:

$$\frac{(6{,}0\ \ mm).(4405\ \ embalados)+(8{,}0\ \ mm).(6902\ \ embalados)}{15080\ \ embalados}=5{,}4$$

TABELA 3.9 - Custos de proteção anualizados, doses coletivas anuais, doses individuais e esforço físico para as opções:

Opção da Proteção	Custo anual da proteção X - R$	Dose individual anual média (Sv)	Dose coletiva anual (Sv.pessoa)	Esforço Físico
1	110.000,00	0,008652	0,0173	5,40
2	122.000,00	0,008367	0,0167	8,00
3	130.000,00	0	0	0
4	142.000,00	0	0	0

3.5 Atributos e técnicas de ajuda para a tomada de decisão

Atendendo a normas nacionais [8], os atributos a serem obrigatoriamente considerados seriam o custo das opções e suas respectivas doses coletivas, com o valor de alfa equivalente a US$ 10.0000 Sv.pessoa. Considerando o câmbio de US$ 1,00 equivalente a R$ 2,00 em 18/06/2009, o valor alfa adotado será:

$$\alpha = \text{R\$ } 20.000{,}00 \text{ / Sv.pessoa}$$

Por outro lado, considerando que o intuito do princípio da otimização é diminuir as doses individuais, poder-se-ia considerar como atributo, também as doses individuais. Por fim, julga-se que o esforço físico provocado pelas três opções, também, poderia ser considerado como um atributo, que é completamente qualitativo. Considerando unicamente os dois atributos obrigatórios tem-se disponíveis, mais simples, as três

primeiras técnicas mencionadas na seção 2.2. Neste caso os outros dois atributos deverão ser tratados qualitativamente. Para tratar todos os quatro atributos quantitativamente, forçosamente teremos que fazer uso de uma ou mais das três últimas técnicas de ajuda para a tomada de decisão. Destas, descarta-se de antemão a técnica de custo-benefício expandida que onera unicamente o valor alfa sem manter separados os dois parâmetros qualitativos.

3.6 Aplicação da técnica de otimização e obtenção da solução analítica.

3.6.1 Análise custo-eficácia

Montando um gráfico de custo de proteção pela dose coletiva, FIG. 3.10, com as quatro opções propostas no presente trabalho, vê-se que a opção 4 tem um custo de proteção maior que a opção 3 e tem a mesma dose coletiva, portanto a opção 4 é eliminada.

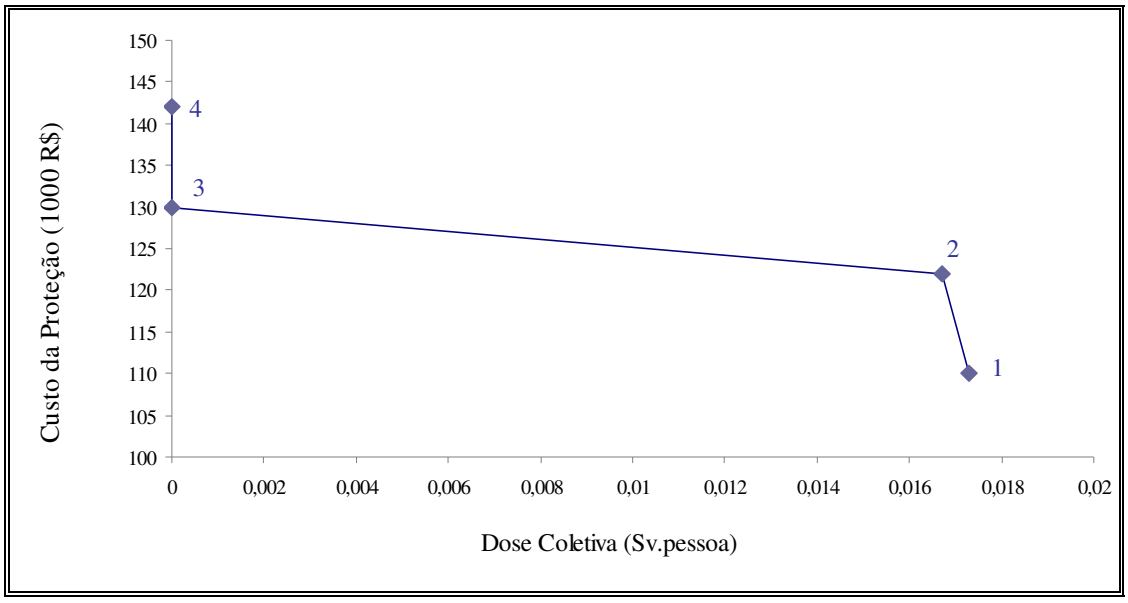


FIGURA 3.9 – Custo da proteção versus dose coletiva.

3.6.2 Análise de custo-benefício

Uma característica importante nas análises de custo-benefício diferencial e integral é que os atributos que influenciam a decisão são expressos em termos monetários. Para expressar o detrimento associado a cada opção em termos monetários, multiplica-se a

dose coletiva gerada por cada opção pelo valor α. Lembrando que o valor de alfa a ser considerado no presente trabalho será: α = R$ 20.000,00/ Sv.pessoa.

3.6.2.1 Análise de custo-benefício diferencial

Na aplicação da análise de custo-benefício diferencial ocorre a comparação do aumento do custo da proteção com a conseqüente redução da dose coletiva, usando a razão custo-eficácia. Nessa técnica é calculada a variação no custo da proteção e a variação na dose coletiva entre as opções. Os cálculos da análise de custo-benefício diferencial estão dispostos na TAB. 3.9:

TABELA 3.10 - Razões de custo-eficácia para as opções consideradas.

Opção da Proteção	Custo da Proteção X (R$)	Variação no Custo $\Delta X(X_i - X_{i-1})$ (R$)	Dose Coletiva S (Sv.pessoa)	Variação na Dose $\Delta S(S_{i-1} - S_i)$ (Sv.pessoa)	Razão Custo Eficácia ($\Delta X/\Delta S$) (R$ por Sv.pessoa)
1	110.000,00		0,0173		
		12.000,00		0,0006	20.000.000,00
2	122.000,00		0,0167		
		8.000,00		0,0167	<u>479.041,92</u>
3	130.000,00		0		

A solução analítica de acordo com esta técnica será aquela que apresentar uma razão custo-eficácia $\Delta X/\Delta S < \alpha$, como não existe esta opção, o valor mais próximo é o sublinhado que fornece a opção 2 como solução analítica.

3.6.2.2 Análise de custo-benefício integral

Para esta análise monta-se a TAB. 3.11 e a solução analítica esta sublinhada. Os outros dois atributos a serem considerados qualitativamente serão discutidos a seguir.

TABELA 3.11 - Análise de custo-benefício integral para as opções consideradas

Opção de Proteção	Custo da Proteção X (R$)	Dose Coletiva S (Sv.pessoa)	Custo do Detrimento Y = αS (R$)	Custo Total (X+Y) (R$ por Sv.pessoa)
1	110.000,00	0,0173	346,00	110.346,00
2	122.000,00	0,0167	334,00	122.334,00
3	130.000,00	0	0,00	130.000,00

Com a análise de custo-benefício diferencial encontra-se a opção 2 como solução analítica, diferente da análise de custo-benefício integral, que aponta a opção 1. Como as opções 1 e 2 têm valores muito próximos, a análise diferencial não consegue identificar o ponto mínimo. Com a aplicação da análise integral foi possível encontrar o verdadeiro mínimo e assim, para as análises de custo-benefício, a solução ótima encontrada é a opção 1.

3.6.3 Análise de prioridades com atributos múltiplos

Essa técnica consiste em agregar pontos aos atributos pertinentes e a opção que tiver a maior quantidade de pontos terá preferência. A prioridade total, no presente trabalho, é representada pela expressão: $U_i = u(X).k(X) + u(S).k(S) + u(I).k(I) + u(F).k(F)$. Onde,

- u(X), u(S), u(I), u(F) são as funções de prioridade parcial para cada atributo, a saber: custo de proteção, dose coletiva, dose individual e esforço físico; e
- k(X), k(S), k(I), k(F) são as constantes de crescimento, que fornecem a importância relativa de cada atributo.

Para as funções de prioridade parcial são atribuídos os valores: 0 para as consequências mais adversas e 1 para as consequências menos adversas. 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 da proteção, assume-se que a função prioridade parcial vale 1 para o custo da opção 1 e zero para o custo da opção 4. Fazendo o gráfico com esses dois pontos

extremos, consegue-se encontrar os outros dois pontos intermediários da função u(x) como se observa na FIG. 3.10:

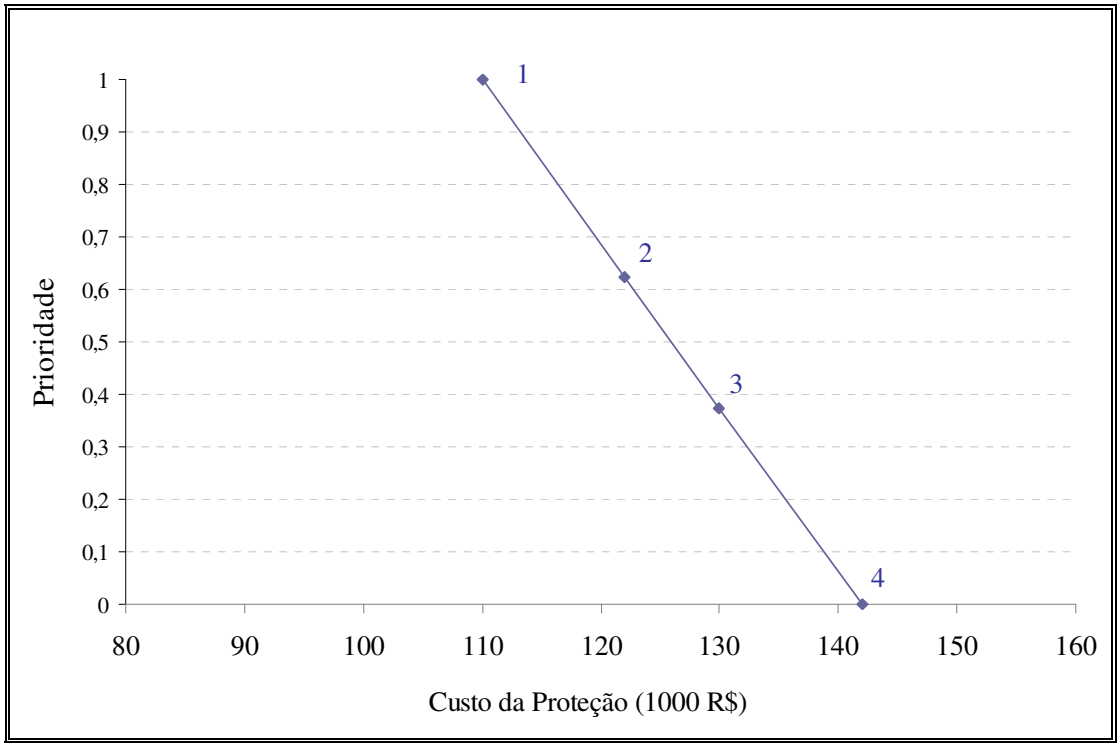


FIGURA 3.10: Função prioridade parcial do custo da proteção – u(x).

Os gráficos das funções prioridade parcial para a dose coletiva, dose individual e esforço físico são mostrados nas FIG. 3.11, FIG. 3.12 e FIG. 3.13 respectivamente.

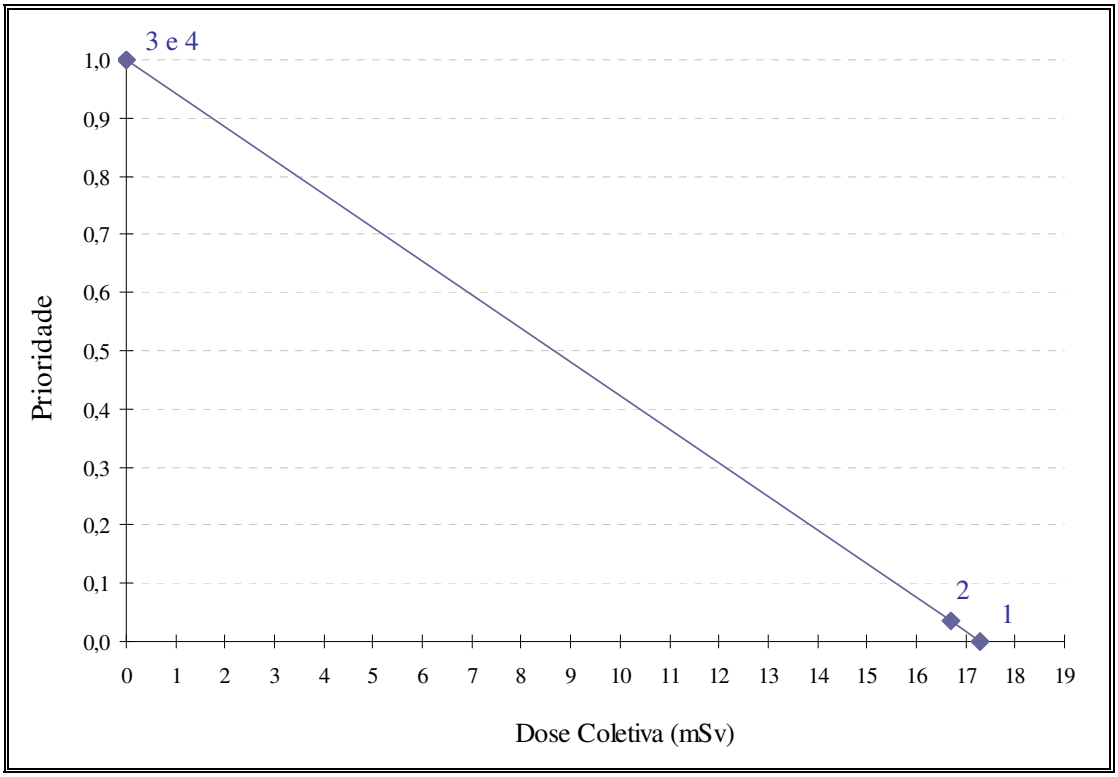


FIGURA 3.11: Função prioridade parcial da dose coletiva – u(S).

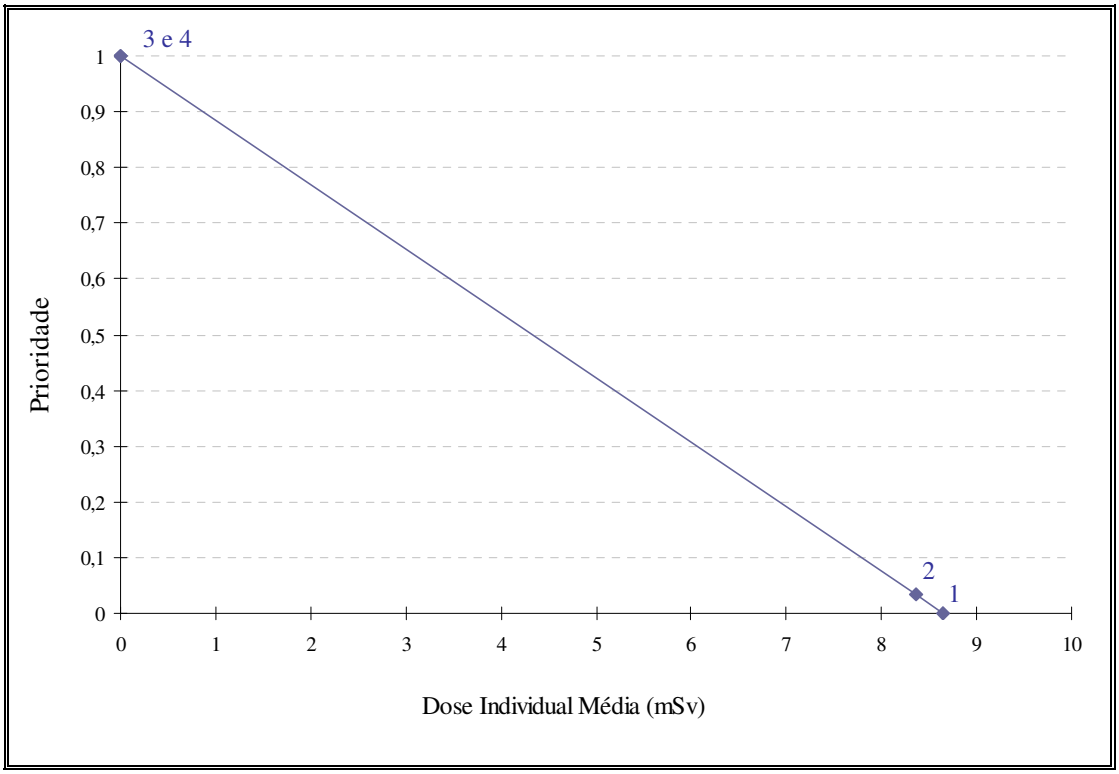


FIGURA 3.12: Função prioridade parcial da dose individual média – u(I).

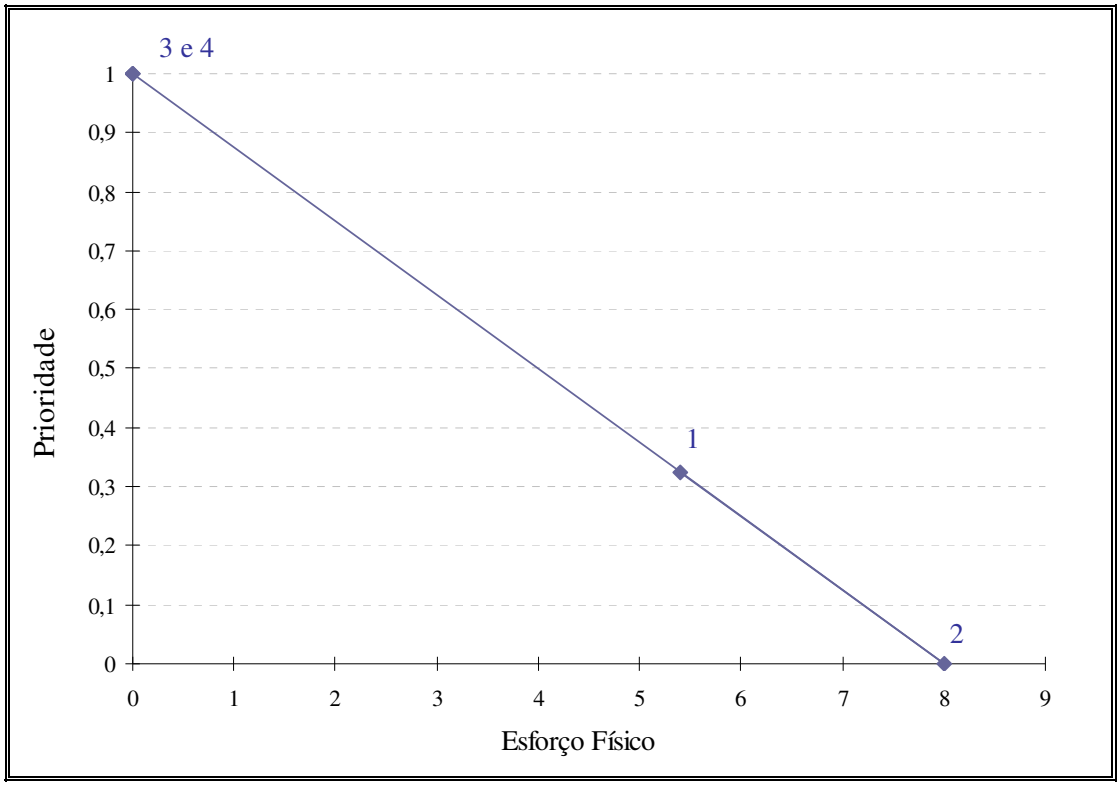


FIGURA 3.13: Função prioridade parcial do esforço físico – u(F).

Os valores das prioridades parciais são apresentados na TAB. 3.12:

TABELA 3.12: Análise de prioridades parciais para as opções consideradas.

Opção da Proteção	Custo da Proteção X (R$)	Dose Coletiva - S (Sv.pessoa)	Dose Individual Média - I (Sv)	Esforço Físico F	Prioridades Parciais			
					u(X)	u(S)	u(I)	u(F)
1	110.000,00	0,0173	0,008652	5,4	1	0	0	0,33
2	122.000,00	0,0167	0,008367	8	0,62	0,03	0,03	0
3	130.000,00	0	0	0	0,37	1	1	1
4	142.000,00	0	0	0	0	1	1	1

Para conseguir as constantes de crescimento, optou-se aplicar o método de avaliação por razões de substituição, sendo que os atributos pertinentes são colocados em ordem decrescente de importância. Como o intuito primordial é diminuir as doses

individuais, foi dada maior importância a este atributo, seguido pelo custo da opção, depois o esforço físico e por fim a dose coletiva por ser já muito pequena.

Em seguida é atribuída a importância de cada atributo em relação ao custo da proteção. Para se fazer essa relação é necessário responder a seguinte pergunta: quanto você está disposto a pagar para se ir da maior dose individual para a menor dose individual? Respondendo a essa pergunta para todos os atributos pertinentes tem-se as seguintes equações:

$$k(I) = 1{,}5\ k(X) \tag{3.1}$$

$$k(F) = 0{,}7\ k(X) \tag{3.2}$$

$$k(S) = 0{,}3\ k(X) \tag{3.3}$$

Como $k(X) + k(I) + k(F) + k(S) = 1$, substituindo, temos

$$k(X) + 1{,}5\ k(X) + 0{,}7\ k(X) + 0{,}3\ k(X) = 1$$

$$3{,}5\ k(X) = 1 \quad \text{ou} \quad k(X) = 0{,}28$$

Substituindo o valor de k(X) nas equações (3.1) a (3.3), têm-se as seguintes constantes de crescimento:

$$k(I) = 0{,}43$$

$$k(X) = 0{,}28$$

$$k(F) = 0{,}20$$

$$k(S) = 0{,}09$$

As prioridades parciais com crescimento e as prioridades totais são apresentadas na TAB. 3.13.

TABELA 3.13: Análise de prioridades parciais com crescimento e prioridades totais para as opções consideradas.

Opção da Proteção	Prioridades Parciais				Prioridades Parciais com Crescimento				Prioridades Totais
	u(X)	u(S)	u(I)	u(F)	k(X)u(X)	k(S)u(S)	k(I)u(I)	k(F)u(F)	
1	1	0	0	0,33	0,28	0	0	0,066	0,35
2	0,62	0,03	0,03	0	0,18	0,003	0,013	0	0,19
3	0,37	1	1	1	0,11	0,09	0,43	0,20	0,83
4	0	1	1	1	0	0,09	0,43	0,20	0,72

Nessa técnica a opção que tiver mais pontos tem a preferência sobre as demais, na TAB. 3.13 a opção analítica está sublinhada.

3.5.4 Análise com critérios múltiplos excedentes

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 TAB. 3.13, percebe-se que a opção 1 leva vantagem sobre a 2 no custo da proteção e no esforço físico, nos outros atributos a opção 2 é mais vantajosa, portanto utilizando as constantes de crescimento já calculadas, soma-se as constantes de crescimento dos atributos onde a opção 1 é mais vantajosa que a opção2:

$$Ad_{1,2} = k(X) + k(S) + k(I) + k(F)$$

$$Ad_{1,2} = 0{,}28 + 0 + 0 + 0{,}20$$

$$Ad_{1,2} = 0{,}48.$$

Na TAB 3.14, estão apresentados os indicadores de vantagens calculados desta forma.

TABELA 3.14 - Indicadores de vantagem para as opções consideradas, comparadas uma com as demais opções.

m	**1**	**2**	**3**	**4**
i		**$Ad_{i,m}$**		
1	-	0,48	0,28	0,28
2	0,52	-	0,28	0,28
3	0,72	0,72	-	1
4	0,72	0,72	0,72	-

Como o objetivo do presente trabalho é diminuir as doses individuais, o critério de exclusão escolhido foi a dose individual com um limiar de exclusão de 0,4 mSv. A diferença entre as opções 1 e 2 para a dose individual é 0,3 mSv, que é menor que o valor do limiar de exclusão escolhido, portanto

$$Ec_{1,2} = Ec_{2,1} = 0$$

Repedindo esta operação para as demais opções monta-se a TAB. 3.15:

TABELA 3.15 – Critérios de exclusão para as opções consideradas comparadas com as demais para a dose individual média.

m	**1**	**2**	**3**	**4**
i		$\mathbf{Ec_{i,m}}$		
1	-	0	1	1
2	0	-	1	1
3	1	1	-	0
4	1	1	0	-

Comparando as opções que não se excluem e verificando os valores de índice de vantagem, temos que a opção 2 excede a 1 e que a 3 excede a 4, portando esta análise fornece duas soluções analíticas, a opção 2 e 3, que excedem as demais mas não se excedem entre si. Como o critério de eliminação é a dose individual, a opção ótima passa a ser a opção 3, que tem a menor dose individual.

4. ESTUDO DE SENSIBILIDADE

O estudo de sensibilidade tem como objetivo avaliar a robustez da solução analítica, sendo possível verificar em que intervalo a opção se mantém ótima.

Com as análises de custo-benefício a solução ótima é a opção 1, para verificar a robustez dessa solução considera-se variações no valor alfa, no custo da proteção e na dose coletiva. O intervalo de valores alfa para os quais a opção se mantém como solução analítica pode ser determinado pela seguinte equação:

$$(X_1+\alpha S_1) = (X_2+\alpha S_2) \tag{4.1}$$

$$\alpha = \frac{X_2 - X_1}{S_2 - S_1} = \frac{12.000,00}{0,0006}$$

$$\alpha = \text{R\$ } 20.000.000,00$$

Resolvendo a equação 4.1 em função da variação do valor alfa, tem-se que a opção 1 se mantém como solução analítica para alfa inferior a R$ 20.000.000,00.

Para que a solução analítica passe a ser a opção 3, utiliza-se a equação 4.1 para as opções 2 e 3:

$$(X_2+\alpha S_2) = (X_3+\alpha S_3) \tag{4.2}$$

$$\alpha = \frac{X_3 - X_2}{S_2} = \frac{8.000,00}{0,0167}$$

$$\alpha = \text{R\$ } 479.041,92$$

Da equação 4.2 tem-se que com um $\alpha \geq$ R$ 479.041,92a opção 3 passa a ser a solução analítica.

Com a equação 4.1 também é possível determinar com que valor de X_1 a opção 1 deixa de ser ótima:

$$X_1 = X_2 + \alpha S_2 - \alpha S_1 = \text{R\$ } 122.000,00 + \text{R\$ } 334,00 - \text{R\$ } 346,00$$

$$X_1 = \text{R\$ } 121.988,00$$

A solução analítica continua sendo a opção 1 se o seu custo de proteção for menor que R$ 121.987,00.

Mantendo o custo da opção 1, X_1 = R$ 110.000,00, é possível calcular para que valor a opção 2 passe a ser ótima a partir da equação 4.1:

$$X_2 = X_1 + \alpha S_1 - \alpha S_2 = R\$\ 110.000,00 + R\$\ 346,00 - R\$\ 334,00$$

$$X_2 = R\$\ 110.012,00$$

Outra maneira da opção 2 passar a ser a solução analítica é se o custo da proteção passar de R$ 130.000,00 para R$ 1106.012,00

Comparando a opção 2 com a opção 3 para que a opção ótima passe a ser a opção 3, tem-se:

$$X_3 = X_2 + \alpha S_2 = 122.000,00 + 334,00$$

$$X_3 = R\$\ 122.334,00$$

Assim a solução ótima será a opção 3 se o custo de proteção for de R$ 122.334,00.

Realizando um processo análogo para a dose coletiva, utilizando as equações 4.1 e 4.2, encontra-se os intervalos de dose coletiva para os quais a opção 1 continua sendo a solução analítica e em que intervalos as opções 2 e 3 passam a ser a solução analítica.

Se o valor de $S_1 < 0,62$ Sv.pessoa a solução analítica continua sendo a opção 1, consequentemente se $S_1 \geq 0,62$ Sv.pessoa a solução analítica passa a ser a opção 2.

Para a solução analítica passar a ser a opção 3, a dose coletiva da opções 2 deve ser: $S_2 \geq 0,40$ Sv.pessoa.

Para verificar a robustez da solução analítica conseguida com a análise de prioridades com atributos múltiplos e análise com critérios múltiplos excedentes, foram variados os valores das constantes de crescimento. Como um caso extremo, varia-se as constantes de crescimento, dando importâncias excessivas.

Considerando que o tomador de decisão está disposto a pagar o dobro do custo da proteção para a dose coletiva, que é uma importância excessiva para uma dose coletiva pequena, como aquela em apreço:

$$k(S) = 2k(X)$$

E os outros dois atributos continuam valendo: $k(I) = 1,5\ k(X)$ e $k(F) = 0,7\ k(X)$. As constantes de crescimento passam a valer:

$$k(S) = 0,38$$

$$k(I) = 0,28$$

$$k(X) = 0,19$$

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

Mesmo considerando que o tomador de decisão assumiria um custo muito elevado para um dose coletiva baixa, a opção 3 continua sendo a solução ótima.

Se for atribuída ao esforço físico uma importância equivalente a duas vezes o custo da proteção, que como no caso da dose coletiva é atribuída uma importância excessiva demais, e se forem mantidas as importâncias assumidas anteriormente, aos outros dois atributos, isto é: k(F) = 2 k(X), k(I) = 1,5 k(X) e k(S) = 0,3 k(X). As constantes de crescimento passam a valer:

$$k(F) = 0{,}42$$

$$k(I) = 0{,}31$$

$$k(X) = 0{,}21$$

$$k(S) = 0{,}06$$

Com essas constantes de crescimento a solução analítica continua sendo a opção 3. Para verificar se a solução continua a mesma com o custo da proteção sendo o atributo mais importante, assume-se que a importância da dose individual e do esforço físico são iguais a 30% do custo da proteção e que para a dose coletiva essa importância é de 20% do custo da proteção, a saber:

$$k(I) = 0{,}30\ k(X)$$

$$k(F) = 0{,}30\ k(X)$$

$$k(S) = 0{,}20\ k(X)$$

As constantes de crescimento passam a ser:

$$k(X) = 0{,}55$$

$$k(I) = 0{,}17$$

$$k(F) = 0{,}17$$

$$k(S) = 0{,}11$$

Para estas importâncias do custo da proteção e dos outros 3 atributos, a solução analítica passa da opção 3 para a opção 1 na análise de prioridade com atributos múltiplos e análise com critérios múltiplos excedentes.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

Nas técnicas de análise de custo-benefício, a saber: análise custo-eficácia, custo-benefício diferencial e custo-benefício integral, os atributos considerados foram apenas a dose coletiva e o custo da proteção e os outros dois atributos, a dose individual média para a realização da tarefa e o esforço físico devem ser tratados qualitativamente.

Neste caso, examinando a TAB. 3.12, vê-se que se da opção 1, passa-se para a opção 4, a dose individual diminui para o valor zero e o esforço físico também, mas o custo da proteção aumenta de R$ 32.000,00. Se observarmos a opção 3, a dose individual e o esforço físico também passam a ser zero, e o aumento no custo para passar da opção 1 para 3 é de R$ 20.000,00. Portanto, a opção 4 é eliminada, por aumentar o custo da opção sem um aumento no benefício fornecido pelos atributos tratados qualitativamente. Neste caso resta saber se os dois atributos tratados qualitativamente são tão importantes, que conseguem levar a solução ótima para a opção 3 com um aumento do custo da proteção de R$ 20.000,00.

Na aplicação das técnicas análise de prioridades com atributos múltiplos e análise com critérios múltiplos excedentes, considerou-se as quatro opções, pois não impõem o valor alfa e aceitam múltiplos atributos, inclusive os difíceis de serem quantificados, como no caso do esforço físico. Nestas duas análises a solução analítica foi a opção 3.

A análise de sensibilidade foi aplicada para verificar a robustez da solução analítica. A tabela 5.1 mostra um resumo das condições necessárias para que a solução ótima continue sendo a opção 1 e as condições para que a solução analítica passe da opção1 para a opção 2 e da opção 2 para opção 3 nas análises de custo-benefício.

TABELA 5.1: Resumo dos intervalos em que as opções se mantêm como solução ótima.

Solução Analítica		
Opção 1	**Opção 2**	**Opção 3**
Cenário 1 A	**Cenário 2 A**	**Cenário 3 A**
$X_1 <$ R$ 121.988,00	$X_1 \geq$ R$ 121.988,00	$X_2 =$ R$ 122.000,00
$X_2 =$ R$ 122.000,00	$X_2 =$ R$ 122.000,00	$X_3 \leq$ R$ 122.334,00
$\alpha =$ R$ 20.000,00	$\alpha =$ R$ 20.000,00	$\alpha =$ R$ 20.000,00
Cenário 1 B	**Cenário 2 B**	**Cenário 3 B**
$X_1 =$ R$ 110.000,00	$X_1 =$ R$ 110.000,00	$X_2 \geq$ R$ 129.666,00
$X_2 >$ R$ 110.012,00	$X_2 \leq$ R$ 110.012,00	$X_3 =$ R$ 130.000,00
$\alpha =$ R$ 20.000,00	$\alpha =$ R$ 20.000,00	$\alpha =$ R$ 20.000,00
Cenário 1 C	**Cenário 2 C**	**Cenário 3 C**
$X_1 =$ R$ 110.000,00	$X_1 =$ R$ 110.000,00	$X_2 =$ R$ 122.000,00
$X_2 =$ R$ 122.000,00	$X_2 =$ R$ 122.000,00	$X_3 =$ R$ 130.000,00
$\alpha <$ R$ 20.000.000,00	$\alpha \geq$ R$ 20.000.000,00	$\alpha \geq$ R$ 479.041,92
Cenário 1 D	**Cenário 2 D**	**Cenário 3 D**
$S_1 <$ 0,62 Sv.pessoa	$S_1 \geq$ 0,62 Sv.pessoa	$S_2 \geq$ 0,40 Sv.pessoa
$S_2 =$ 0,0167 Sv.pessoa	$S_2 =$ 0,0167 Sv.pessoa	$S_3 = 0$

Analisando os cenários 2 A e 2 B da tabela 5.1 verifica-se que a opção 2 vai ser a solução analítica se a diferença entre X_1 e X_2 for inferior a R$ 12,00, o que é impossível já que dentro das configurações analisadas, a diferença entre X_1 e X_2 é de R$ 12.000,00 e o custo destas proteções depende basicamente do chumbo, se houver um aumento ou uma diminuição no preço do chumbo o custo das duas opções será afetado. Outra maneira da opção ótima passar da opção 1 para 2 é se o valor alfa for superior a R$ 20.000.000,00 como pode-se observar no cenário 1C, que é um valor exorbitante com relação ao α assumido pela CNEN no Brasil, inclusive é muito superior ao intervalo sugerido pela OIEA que é de US$ 3.000,00 a US$ 40.000,00 [21, 22]

Observa-se ainda no cenário 3A que para a opção 3 passar a ser a solução ótima, a diferença entre X_2 e X_3 deve ser de R$ 334,00. Como a principal diferença entre os custos da proteção das opções 2 e 3 é o custo da esteira transportadora, fica impossível a opção 3 ser ótima. Para isso a esteira transportadora deveria passar a custar R$ 332,00 por ano ao invés dos R$ 20.000,00 por ano. No cenário 3C para a opção 3 ser a solução analítica, o valor alfa deve ser superior a R$ 479.041,92 que como no cenário 1C, é um valor exorbitante com relação ao α assumindo pela CNEN no Brasil.

No cenário 2D a opção 2 passa a ser ótima se $S_1 \geq 0{,}62$ Sv.pessoa que é um valor muito maior que o medido que é de $S_1 = 0{,}0173$ Sv.pessoa. E no cenário 3D para a opção 3 ser ótima $S_2 \geq 0{,}40$ Sv.pessoa que também é um valor muito maior que o medido, $S_2 = 0{,}0167$ Sv.pessoa. Portanto, a análise de sensibilidade realizada nas análises de custo-benefício mostra a robustez da opção 1 como solução analítica.

Na análise de sensibilidade realizada para a análise de prioridades com atributos múltiplos e análise com critérios múltiplos excedentes, a solução ótima só passa da opção 3 para a opção 1, se a importância atribuída a dose individual, dose coletiva e ao esforço físico for excessivamente diminuída, o que consequentemente eleva a importância dada ao custo da proteção.

6. TRABALHOS FUTUROS

1. Efetuar um estudo de sensibilidade descontando os salários dos funcionários nos custos das opções 3 e 4;
2. Refazer esse estudo de otimização levando em consideração o transporte do material radioativo;
3. Efetuar um estudo mais aprofundado das doses individuais dos trabalhadores envolvidos na produção dos radiofármacos para verificar se ocorre a discrepância entre as doses individuais recebidas pelos trabalhadores que realizam a mesma tarefa como é observado nas TAB. 3.2 e TAB. 3.3;
4. Organizar um treinamento em proteção radiológica para os trabalhadores envolvidos na produção de radiofármacos, com o objetivo de padronizar os procedimentos, para que a dose individual de cada trabalhador, que realiza a mesma tarefa seja próxima do valor médio das doses de todos eles;
5. Efetuar um estudo de otimização dos demais locais do Centro de Radiofarmácia onde os trabalhadores recebem doses que necessitam ser diminuídas, aplicando as técnicas de ajuda para tomada de decisão;
6. Efetuar um estudo para a construção de estruturas fechadas para armazenagem dos embalados por transportadora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. INTERNATIONAL COMMISION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commision on Radiological Protection.** (Adopted September 9, 1958). London, 1959. (ICRP 1).

2. INTERNATIONAL COMMISION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Radiation Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Oxford, 1977. 80 p. (ICRP 26).

3. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection:** adopted by the Commission in November 1990. Oxford, 1991. 201 p. (ICRP 60).

4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources.** Vienna, 1996. 353 p. (IAEA SS-115; Safety Series, 115).INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Oxford, 2007. (ICRP 103).

6. INTERNATIONAL COMMISION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Implications of commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable.** Oxford, 1973. 18 p. (ICRP 22).

7. INTERNATIONAL COMMISION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection. A report of committee 4 of the International Commission on Radiological Protection.** 1983. 74 p. (ICRP 37).

8. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and decision-making in radiological protection.** Oxford, 1989. 60 p. (ICRP 55).

9. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLAR. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.** Rio de Janeiro, Janeiro de 2005. (CNEN-NN-3.01).

10. ACOSTA PEREZ, C.F; SORDI, G.M.A.A; MENDONÇA, A.G **Cálculo para Otimização de Blindagens de Célula Quente**. In: 9º Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica, 25-29 de outubro, 1993, Caxambu, MG. p. 503-508.

11. ANTONIO FILHO, JOÃO. **Otimização do Sistema de Radioproteção nas Instalações Radiográficas de Gamagrafia.** 1999. Tese (Doutoramento) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - São Paulo.

12. WILLEMENT, JEAN-MARC. **Optimizing Radiological Protection in Generator Replacements.** In: 9º International Congress of the International Radiation Protection Association. Viena, Áustria, Abril 1996.

13. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - EQUIPE OPERACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. **Relatório Anual de Atividades do Centro de Radiofarmácia.** São Paulo, 2008. (RAT-CR 2008).

14. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - EQUIPE OPERACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. **Relatório Anual de Atividades do Centro de Radiofarmácia.** São Paulo, 2007. (RAT-CR 2007).

15. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Principles for the radiation protection of workers**. Viena, 1997 (ICRP-75).

16. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **General principles of monitoring for radiation protection of workers.** Oxford, 1982. 36 p. (ICRP 35).

17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic requirements for personnel monitoring: a code of practice**. 1980 edition. Vienna, 1980. 48 p. (IAEA SS-14/1980; Safety Series, 14).

18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic principles for occupational radiation monitoring.** Vienna, 1987. 32 p. (IAEA SS-84; Safety Series 84).

19. FONSECA, LIZANDRA P.S.; GERULIS, EDUARDO; SANCHES, MATIAS P.; SORDI, GIAN M.A.A. **Estimation of the radiation effective dose for workers in ^{99m}Tc generator production**. In: 12º International Congress of the International Radiation Protection Association. Buenos Aires, October 19-24.

20. GERULIS, EDUARDO. **Controle da dose de radiação ionizante para trabalhadores em uma instalação radiativa com fontes não-seladas**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Assigning a value to transboundary radiation exposure.** Vienna, 1985. 21 p. (IAEA SS-67; Safety Series, 67).

22. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency.** Vienna, 1994. 117 p. (IAEA SS-109; Safety Series, 109).