



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

OTIMIZAÇÃO EM RADIOPROTEÇÃO

CLARICE DE F. ACOSTA PEREZ

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador:
Dr. Gian-Maria A. A. Sordi

São Paulo
1996

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

OTIMIZAÇÃO EM RADIOPROTEÇÃO

CLARICE DE F. ACOSTA PEREZ

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de Mestre
em Ciências na Área de Reatores Nucleares de
Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear.**

Orientador:

Dr. Gian-Maria A. A. Sordi



São Paulo

1996

**Aos meus familiares: Ramón, Nazareth, Ailton,
Adriane e ...**

Dedico

AGRADECIMENTOS

- Ao Dr. Gian-Maria A.A. Sordi, Assessor Técnico Científico da Proteção Radiológica do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN/SP, pelo incentivo e orientação.
- À Dra. Linda V. E. Caldas, presidente da Comissão de Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN/SP, pelo incentivo.
- À Dra. Elisa Kyioka Tomida, chefe da Assessoria de Segurança Nuclear do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTM-SP, pelo incentivo.
- Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTM-SP, pelas facilidades concedidas
- À amiga MSc. Adélia Sahyun, pelo incentivo.
- À amiga Lúcia Estela Menegatti, pelo apoio.
- Aos amigos Miriam, Gelson, Demerval, Nanci, Marcão, Ricardo e Joaquim pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.
- Ao Ailton, meu esposo, pela paciência e pelo carinho com que sempre me apoiou em minha vida profissional.

OTIMIZAÇÃO EM RADIOPROTEÇÃO

Clarice de Freitas Acosta Perez

RESUMO

O conceito de otimização da proteção é, em sua natureza, prático. Em todos os aspectos nos quais se lida com a proteção do homem, é necessário tomar decisões frequentes tais como: qual é o nível de proteção a ser fornecido, uma vez que todos os níveis de proteção alcançam doses inferiores aos limites pertinentes. A otimização fornece um quadro básico de pensamento que é próprio para levar a uma espécie de balanço dos recursos colocados na proteção e o nível de proteção obtido, contra uma série de outros fatores e vínculos de modo a obter o melhor resultado. Neste trabalho foi realizada a otimização, sob o ponto de vista da radioproteção, do projeto de uma instalação composta por duas celas blindadas onde serão manipuladas miniplacas de UO_2 com 50% de queima do nuclídeo U-235, irradiadas no reator de pesquisa IEA-R1. Para tanto foram especificados os fatores e critérios relevantes, aplicadas as principais técnicas de ajuda para tomada de decisão, adotadas atualmente e realizado um estudo de sensibilidade dos fatores e critérios envolvidos. Para uma maior agilidade na aplicação das técnicas de ajuda para tomada de decisão foi desenvolvido um programa de micro computador.

OPTIMIZATION ON RADIOLOGICAL PROTECTION

Clarice de Freitas Acosta Perez

ABSTRACT

The optimization concept in radiation protection is, in its essence, practical. In each aspect that we deal with the man, it is necessary to take frequent decisions such as: what is the protection level to be pursued, since the protection levels under consideration provide doses lower than the appropriate annual limits. The optimization give us a basic framework of the minding that is appropriate to conduct to a balance kind of the resources available for the protection and protection level obtained against a multitude of factors and constrains in a manner to obtain the best result. In this work, was performed the optimization, from the radiation protection point of view, of a facility project who enclose two shielded hot cells where will be handled UO_2 small plate with 50% of U-235 burn-up, irradiated in the research swimming pool reactor, IEA-R1. To obtain this goal were specified the relevant factors and criteria, were applied the main techniques used in a decision-making in radiological protection, presently adopted and was performed a sensibility study of the factors and criteria used in this work. In order to obtain a greater agility in applying the techniques for decision-making was developed a micro computer program.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	Página
1.1 - Notas Históricas	1
1.2 - Proteção Radiológica Operacional	7
1.3 - Conceito de Detrimento e Dose Coletiva	13
 2 - CONCEITUAÇÃO TEORIA	
2.1 - Principais Técnicas de Ajuda para a Tomada de Decisão Adotadas Atualmente	15
2.2 - Descrição das Técnicas de Ajuda para a Tomada de Decisão.....	17
2.2.1 - Introdução.....	17
2.2.2 - Análise Diferencial Custo -Benefício	19
2.2.3 - Análise Custo-Benefício.....	21
2.2.4 - Análise Custo-Benefício Expandida	23
2.2.5 - Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos.....	25
2.3 - Estruturação dos Problemas.....	28
2.4 - Custos de Proteção.....	30
2.5 - Termo α	31
2.6 - ORIGEN e ISOSHLD	33
2.6.1 - Código ORIGEN2.....	33
2.6.2 - Código ISOSHLD	34
 3 - CÁLCULOS DE OTIMIZAÇÃO	
3.1 - Descrição do Problema	35
3.1.1 - Finalidade e Objetivos do Presente Estudo	35
3.1.2 - Considerações e Identificação dos Fatores Importantes em Proteção Radiológica	36
1 - Sistema de Ventilação.....	37

2 - Tempo de Resfriamento das Miniplacas	37
3 - Dose Coletiva e Distribuição das Doses Individuais	38
4 - Custo de Proteção X	39
3.2 - Aplicação das Técnicas de Ajuda para a Tomada de Decisão.....	44
3.2.1 - Análise Diferencial Custo-Benefício	44
3.2.2 - Análise Custo-Benefício.....	45
3.2.3 - Análise Custo-Benefício Expandida	46
3.2.4 - Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos.....	50

4 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

4.1 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento	55
4.2 - Análise de Sensibilidade dos Juros Anuais.....	59
4.3 - Análise de Sensibilidade do Critério α	60

5 - RESULTADOS

5.1 - Inventário Físsil das Miniplacas de UO_2	61
5.2 - Doses Individuais a Várias Distâncias e Custos de Proteção Radiológica	63
5.3 - Doses Equivalentes Efetivas Anuais para Diferentes Grupos de Trabalhadores	66
5.4 - Resultados Apresentados na Aplicação da Técnica de Análise Diferencial Custo-Benefício	70
5.5 - Resultados Apresentados na Aplicação da Técnica de Análise Custo-Benefício	76
5.6 - Resultados Apresentados na Aplicação da Técnica de Análise Custo-Benefício Expandida.....	79
5.7 - Resultados Apresentados na Aplicação da Técnica de Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos fazendo uso do Método de Avaliação Direta	83

5.8 - Resultados Apresentados pela Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento.....	87
5.9 - Importância Relativa dos Atributos Considerando a Importância Máxima de cada Constante de Crescimento e seus Valores no Método Lógico....	89
5.10 - Resultados Apresentados pela Análise de Sensibilidade dos Juros Anuais	90
5.11 - Resultados Apresentados pela Análise de Sensibilidade do Valor de α	91

6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1 - Discussão dos Resultados	93
6.1.1 - Análise Diferencial Custo-Benefício	93
6.1.2 - Análise Custo-Benefício.....	94
6.1.3 - Análise Custo-Benefício Expandida	98
6.1.4 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos	99
6.1.5 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento k_j ...	100
6.1.6 - Análise de Sensibilidade das Taxas de Juros.....	101
6.1.7 - Análise de Sensibilidade do Critério α	102
6.2 - Conclusões	103

7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

APÊNDICE 1 - Definições	107
APÊNDICE 2 - Programa de computação para a aplicação das técnicas de otimização	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
TABELAS	
Tabela 1 - Inventário Físsil das Mini placas	61
Tabela 2 - Custo Total e Dose Total para 30 Dias de Decimento	63
Tabela 3 - Custo Total e Dose Total para 60 Dias de Decimento	64

Tabela 4 - Custo Total e Dose Total para 90 Dias de Decimento	64
Tabela 5 - Custo Total e Dose Total para 120 Dias de Decimento	65
Tabela 6 - Custo Total e Dose Total para 150 Dias de Decimento	65
Tabela 7 - Custo Total e Dose Total para 180 Dias de Decimento	66
Tabela 8 - Dose Total para 30 Dias de Decaimento	67
Tabela 9 - Dose Total para 60 Dias de Decaimento	67
Tabela 10 - Dose Total para 90 Dias de Decaimento	68
Tabela 11 - Dose Total para 120 Dias de Decaimento	68
Tabela 12 - Dose Total para 150 Dias de Decaimento	69
Tabela 13 - Dose Total para 180 Dias de Decaimento	69
Tabela 14 - Análise Diferencial Custo-Benefício para 30 Dias de Decaimento	70
Tabela 15 - Análise Diferencial Custo-Benefício para 60 Dias de Decaimento	71
Tabela 16 - Análise Diferencial Custo-Benefício para 90 Dias de Decaimento	72
Tabela 17 - Análise Diferencial Custo-Benefício para 120 Dias de Decaimento	73
Tabela 18 - Análise Diferencial Custo-Benefício para 150 Dias de Decaimento	74
Tabela 19 - Análise Diferencial Custo-Benefício para 180 Dias de Decaimento	75
Tabela 20 - Análise Custo-Benefício para 30 Dias de Decaimento	76
Tabela 21 - Análise Custo-Benefício para 60 Dias de Decaimento	77
Tabela 22 - Análise Custo-Benefício para 90 Dias de Decaimento	77
Tabela 23 - Análise Custo-Benefício para 120 Dias de Decaimento	78
Tabela 24 - Análise Custo-Benefício para 150 Dias de Decaimento	78
Tabela 25 - Análise Custo-Benefício para 180 Dias de Decaimento	79
Tabela 26 - Análise Custo-Benefício Expandido para 30 Dias de Decaimento	80

Tabela 27 - Análise Custo-Benefício Expandido para 60 Dias de Decaimento	80
Tabela 28 - Análise Custo-Benefício Expandido para 90 Dias de Decaimento	81
Tabela 29 - Análise Custo-Benefício Expandido para 120 Dias de Decaimento	81
Tabela 30 - Análise Custo-Benefício Expandido para 150 Dias de Decaimento	82
Tabela 31 - Análise Custo-Benefício Expandido para 180 Dias de Decaimento	82
Tabela 32 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos para 30 Dias de Decaimento	83
Tabela 33 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos para 60 Dias de Decaimento	84
Tabela 34 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos para 90 Dias de Decaimento	84
Tabela 35 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos para 120 Dias de Decaimento	85
Tabela 36 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos para 150 Dias de Decaimento	85
Tabela 37 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos para 180 Dias de Decaimento	86
Tabela 38 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento	87
Tabela 39 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento para Valores de: $k(X) = 0,7$, $k(T) = 0,1$, $k(D) = 0,1$, $k(S) = 0,1$	88
Tabela 40 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento para Valores de: $k(X) = 0,1$, $k(T) = 0,7$, $k(D) = 0,1$, $k(S) = 0,1$	88
Tabela 41 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento para Valores de: $k(X) = 0,1$, $k(T) = 0,1$, $k(D) = 0,7$, $k(S) = 0,1$	88

Tabela 42 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento para Valores de: $k(X) = 0,1$, $k(T) = 0,1$, $k(D) = 0,1$, $k(S) = 0,7$	89
Tabela 43 - Análise de Sensibilidade dos Juros Anuais.....	91
Tabela 44 - Análise de Sensibilidade dos Juros Anuais.....	91
Tabela 45 - Análise de Sensibilidade do Valor de α	92
Tabela 46 - Análise de Sensibilidade do Valor de α	92
Tablela 47 - Custos de Proteção e de Detrimento para Diferentes Tempos de Decaimento e para a Opção 2.....	95
Tablela 48 - Custos de Proteção e de Detrimento para Diferentes Tempos de Decaimento e para a opção 6	96

FIGURAS

Figura 1 - Processo de Diminuição das Doses Anuais dos Trabalhadores....	10
Figura 2 - Modelo Estruturado para a Otimização da Proteção no Contexto da Tomada de Decisão.....	29
Figura 3 - Importância Relativa dos Atributos.....	90

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Notas históricas

O Sistema de Limitação de Dose surge da necessidade de se proteger os indivíduos dos efeitos nocivos provocados pela radiação. A experiência adquirida nos últimos cinquenta anos mostra que a radiação provoca no indivíduo efeitos biológicos agudos ou efeitos biológicos tardios.

Os efeitos biológicos agudos foram os primeiros a serem observados e, na época, ficou claro que tais efeitos somente ocorriam acima de um limiar de dose. Um exemplo deste efeito é o eritema. Portanto, acreditava-se que existia uma dose tolerável, ou seja, se o limiar de dose não fosse atingido então não ocorreria nenhum efeito deletério diagnosticável.

Nos últimos anos, porém, foi observado que poderiam existir outros efeitos nocivos como o câncer ou o encurtamento do período de vida que mostravam não possuírem um limiar de dose observável mas um comportamento de manifestação completamente aleatório.

Partindo destas hipóteses o sistema de limitação de doses recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR) em 1955⁽¹⁾ estabeleceu:

a) um limite de dose para a população como um todo de **5rem** por geração tomando como base os efeitos biológicos que poderiam ser introduzidos nas futuras gerações com o consequente agravamento do patrimônio hereditário.

b) um limite de **5rem/ano** para os trabalhadores envolvidos em atividades com radiações ionizantes baseado nos efeitos somáticos que poderiam ser adquiridos pela sua exposição à radiação. Para o estabelecimento deste valor foi considerado que o limite deveria ser inferior a todas as doses limiares conhecidas e que os efeitos aleatórios, que são tardios, câncer, encurtamento da vida, não alterassem estatisticamente os valores que se encontram normalmente na população. Desta forma, no trabalhador estas lesões deveriam manter a mesma estatística da população como um todo.

c) foi observada a necessidade de se estabelecer um terceiro grupo de indivíduos conhecidos como indivíduos do público que são as pessoas que vivem nas imediações de instalações onde são emitidas radiações ionizantes e que portanto poderiam receber doses de radiação superiores às da população como um todo mas evidentemente inferiores às dos trabalhadores. Esta fração da população seria superior àquela dos trabalhadores mas muito inferior do que a população como um todo. Dever-se-ia estabelecer um valor intermediário entre os **5rem/ano** do trabalhador e os **167 mrem/ano** para a população como um todo, considerando que a geração tem uma vida média de 30 anos. Optou-se então por **500mrem/ano**. Dentre os indivíduos do público para a aplicação deste limite deve-se considerar o grupo crítico que é aquele grupo de indivíduos, homogêneo em seus hábitos e costumes, que vai receber as maiores doses e portanto o maior dano à saúde.

As grandezas físicas e unidades, com significado não explicitado no texto e que se encontram em negrito, estão definidas no apêndice 1.

Este sistema de limitação de doses máximas permissíveis foi anunciado pela CIPR em 1955 ⁽¹⁾ por ocasião da liberação do uso da energia nuclear para fins pacíficos pelas nações detentoras do conhecimento científico e foi formalizada em 1958 na publicação 1 da CIPR ⁽²⁾.

Em virtude dos efeitos aleatórios provocados pelas radiações ionizantes a CIPR já em 1955 (1) declarou a seguinte proposição:

"Ainda que os valores propostos para as doses máximas permissíveis sejam tais que envolvam um risco que é pequeno comparado com os outros perigos de vida, em virtude da evidência incompleta sobre os quais os valores foram baseados, juntamente com o conhecimento de que alguns efeitos da radiação são irreversíveis e acumulativos, é firmemente recomendado que sejam feitos todos os esforços para reduzir a irradiação, causada pôr todos os tipos de radiação ionizante, aos níveis menores possíveis."

Com esta proposição foram anunciados dois princípios como fundamentos da filosofia de proteção. Um foi o princípio de limite, ou seja, a obediência a um valor de dose máxima permissível e o outro foi o princípio de minimização das doses ao menor nível possível.

Em 1958 a CIPR (2) recomenda que as doses sejam mantidas tão pequenas quanto praticável e não possível, pois o custo de proteção aumenta exponencialmente com a diminuição da dose e então a partir de um certo nível de dose o custo não justificaria o benefício. A CIPR recomenda ainda que qualquer irradiação desnecessária seja evitada.

Em 1959 a CIPR em sua publicação de número 2 (3) , incorpora a publicação de número 1 e desenvolve a metodologia para estabelecer a dose máxima permissível no caso de incorporação de material radioativo, para isso seleciona um órgão crítico para cada radioisótopo ou substância radioativa e despreza os demais órgãos nos quais, por ventura, o material radioativo poderia se depositar. Define-se o órgão crítico como aquele que em virtude da deposição de material radioativo vai provocar o maior dano à saúde do indivíduo internamente exposto. Partindo destes dados básicos

estabelece a carga corporal máxima permissível (CCMP) como sendo aquela atividade no órgão crítico que, se mantida durante todo o ano, provocaria a dose máxima permissível no órgão. Como diferentes órgãos têm diferentes radiosensibilidades, eles foram agrupados em quatro conjuntos e foi estabelecido um limite máximo permissível para cada um deles. Esta filosofia chegou ao seu auge com a publicação de número 9 da CIPR ⁽⁴⁾ e seus conceitos foram incorporados na publicação Safety Series nº9 ⁽⁵⁾ da Agência Internacional de Energia Atômica, AIEA, órgão oficial da Organização das Nações Unidas, ONU. Por fim estes conceitos foram incorporados às normas nacionais, pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, na resolução número 06/73 ⁽⁶⁾. Na publicação de número 9 da CIPR ⁽⁴⁾ a Comissão reconhece a necessidade de se considerar **fatores** econômicos e sociais na determinação dos níveis de dose que poderiam ser considerados tão pequenos quanto praticável.

Desta maneira, na CIPR 9 ⁽⁴⁾, a recomendação toma a seguinte forma:

"Como qualquer irradiação pode envolver algum grau de risco, a Comissão recomenda que qualquer irradiação desnecessária seja evitada e que todas as doses sejam mantidas tão pequenas quanto facilmente exequível, levando em consideração **fatores** econômicos e sociais."

Além disso em seu parágrafo 47, estabelece:

- a) O risco resultante da limitação de dose deve ser apropriadamente pequeno com relação aos benefícios resultantes do procedimento.
- b) A limitação deve ser imposta em níveis suficientemente pequenos de maneira que qualquer esforço na redução do detrimento não seja justificado pelo esforço necessário para alcançá-lo.

- c) No caso de irradiação operacional os perigos não excederiam aqueles que são aceitos na maioria das outras atividades industriais ou científicas que tem um alto padrão de segurança.
- d) O risco aos membros do público provocado pelas fontes de radiação construídas pelo homem seria menor ou igual ao detrimento regularmente aceito na vida diária e seria justificável em termos de benefícios que de outro modo não seriam recebidos.

Ainda que a publicação 9 ⁽⁴⁾ tenha chegado a estas conclusões, elas estavam além da filosofia relativa ao sistema de limitação de dose máxima permissível em vigor. Porém, elas propiciaram o surgimento de novas bases técnicas para formação de um sistema de limitação de dose completamente diferente.

Estas idéias juntamente com o conhecimento de que os cânceres não tinham um caráter aleatório, mas sim probabilístico e que portanto com o aumento da dose aumentaria a probabilidade de contrair o câncer, propiciou a publicação de número 22 da CIPR ⁽⁷⁾ que vem a constituir a base da nova filosofia do sistema de limitação de dose. Nesta publicação, a recomendação de que as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto facilmente exequível levando em consideração **fatores** econômicos e sociais, foi substituído o advérbio facilmente por razoavelmente por exprimir melhor o conceito que a CIPR pretende introduzir, conforme ela própria especifica.

Na publicação 22 ⁽⁷⁾ é informado que um aumento da dose provoca um aumento da probabilidade de ocorrência dos efeitos tardios (cânceres). Portanto, as doses não podem mais ser expressas em termos de uma dose permissível, os métodos de proteção devem ser mais complexos e é prudente supor a existência de um risco adicional de ocorrer um efeito biológico tardio advindo de qualquer incremento de dose acima daquela já recebida pelas fontes naturais. Estes efeitos deletérios probabilísticos foram chamados de efeitos estocásticos.

Em vista disso, a CIPR recomenda que:

- 1 - Para os efeitos biológicos tardios não existe limiar, ou seja, a qualquer dose por menor que seja está associado um risco;
- 2 - Relação dose-efeito é linear.

O desenvolvimento da filosofia fundamental foi completada na publicação 26 da CIPR ⁽⁸⁾, onde os três princípios do sistema de limitação de dose foram estabelecidos e identificados separadamente como segue:

- a) Nenhuma atividade será adotada a não ser que sua introdução produza um benefício líquido positivo;
- b) As doses devem ser mantidas tão pequenas quanto razoavelmente exequível, sendo levados em conta fatores sociais e econômicos.
- c) As **doses equivalentes** individuais não poderão exceder os limites recomendados pela Comissão e pela publicação de número 30 ⁽⁹⁾ que trata das doses internas. A carga corporal máxima permissível foi substituída pelo limite de incorporação anual, LIA.

Os três princípios são conhecidos como (a) da justificativa, (b) da otimização ou ALARA (As Low As Reasonably Achievable) e (c) da limitação.

A filosofia contida na publicação 26 da CIPR ⁽⁸⁾ foi adotada pela AIEA em sua publicação Safety Series nº9 edição de 1982 ⁽¹⁰⁾ e no Brasil pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e publicada na norma CNEN-NE-3.01 de 1988 ⁽¹¹⁾. Esta norma, que está em vigor atualmente, fornece como limite anual máximo admissível de **dose equivalente efetiva** para os trabalhadores o valor de **50 mSv**.

1.2 - Proteção radiológica operacional

Neste item faremos uma rápida alusão aos três princípios enunciados anteriormente. Os limites de dose recomendados pela Comissão são vínculos à otimização; desta maneira os limites anuais estabelecidos pela CIPR são limites superiores que nunca devem ser alcançados. Por isso devem ser considerados como limites anuais máximos admissíveis, isto é, os seus valores só são admitidos se forem justificados e otimizados. Qualquer **opção de proteção** que não satisfaça os limites anuais para trabalhadores e indivíduos do público deverá ser descartada da análise. Faz exceção a essa regra as irradiações médicas, isto é, irradiação de pacientes para fins médicos.

Em virtude do conceito probabilístico de dano à saúde provocado pelas radiações ionizantes para as enfermidades tardias e efeitos hereditários, a proteção radiológica operacional que era de certa maneira estática passou a ter uma função dinâmica. Em outras palavras, o conceito da linearidade na relação dose e efeito biológico provocado pela radiação passando pela origem, dos eixos cartesianos, faz com que devamos diminuir as doses a um nível ótimo, sendo este o segundo princípio.

Na filosofia anterior dos máximos permissíveis, bastava que todo mundo trabalhasse abaixo dos limites de dose. Para tanto, em alguns casos, por exemplo, era limitado o tempo de permanência do trabalhador no local de exposição às radiações ionizantes.

Nesta nova filosofia como devemos diminuir sempre mais as doses, a proteção radiológica operacional teve que ser alterada. Para tanto, foram introduzidos na teoria dois conceitos fundamentais.

O primeiro conceito é relativo às condições dosimétricas dos trabalhadores. Considera-se como condição de trabalho A aquelas em que o trabalhador pode, em suas atividades normais, receber doses maiores do que $3/10$ do limite anual e condições de trabalho B, aquelas em que as doses previstas são no máximo iguais aos $3/10$ do limite anual.

Para o primeiro caso, a condição A, é obrigatória a monitoração individual do trabalhador. Para o segundo caso, condição de trabalho B, é suficiente que se conheçam os níveis de radiação no ambiente de trabalho, portanto é unicamente necessária uma monitoração de área.

O segundo conceito fundamental é estabelecido pelos níveis de referência, isto é, níveis de radiação que, se forem ultrapassados, obrigam uma ação por parte do serviço de proteção radiológica. Destes níveis de referência dois são importantes para o trabalho que se pretende desenvolver.

1) Nível de Registro - é o nível de dose que, se for ultrapassado, obriga o serviço de proteção radiológica a registrar a dose medida. Se as doses forem menores do que o nível de registro ou elas não são registradas ou são registradas como zero. É evidente que se um ponto de monitoração apresentar, em condições normais de trabalho, doses inferiores ao nível de registro, deverá ser eliminado do programa de monitoração. Para a monitoração individual do trabalhador o nível de registro recomendado pelas normas CIPR 26 ⁽⁸⁾ e CNEN-NE-3.01 ⁽¹¹⁾ é de $1/10$ do limite anual de dose na fração de tempo de medida do instrumento, ou seja, se o instrumento medir taxas de **dose equivalente** por hora e se considerarmos as horas de trabalho de 2000 horas/ano o nível de registro será de **$2,5 \mu\text{Sv/h}$** . No caso da monitoração individual que geralmente é mensal, supondo o mês de 4 semanas, o nível de registro será igual a **$0,4\text{mSv/mês}$** , considerando o ano de 50 semanas.

2) Nível de Investigação - é o nível de dose que, se for ultrapassado, obriga o serviço de proteção radiológica a investigar o motivo pelo qual este nível foi infringido. Para a monitoração individual do trabalhador o nível de investigação recomendado pelas normas CIPR 26 ⁽⁸⁾ e CNEN-NE-3.01 ⁽¹¹⁾ é maior que 3/10 do limite anual de dose na fração de tempo de medida do instrumento.

Uma vez descoberto o motivo de ter sido ultrapassado o nível de investigação, o serviço de proteção radiológica deverá aplicar o princípio da otimização, isto é, deverá estudar as opções de proteção disponíveis para diminuir as doses abaixo deste nível. É evidente que, geralmente, para as menores doses teremos as opções de proteção mais caras e para as maiores doses as opções de proteção mais baratas. A escolha de qual será a opção selecionada, será feita através de técnicas de ajuda para tomada de decisão; as principais delas serão discutidas sucintamente no capítulo 2. Estas técnicas nos fornecerão a opção ótima satisfazendo o segundo princípio. 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.

Uma vez implantada a opção ótima deverá ser verificado se as doses evitadas que tinham sido estimadas são confirmadas e em caso contrário justificar. No caso das doses continuarem elevadas, deverá ser efetuado um novo estudo, ou seja, o processo de otimização continua respondendo a pergunta "Será que eu fiz tudo que poderia ser feito para abaixar ainda mais os níveis de dose ou evitar doses aos trabalhadores?". Por esta filosofia, o processo de otimizações sucessivas prosseguirá até que o ambiente de trabalho e as doses nos trabalhadores sejam inferiores a 1/10 do limite anual, isto é, ao nível de registro.

A Figura 1 mostra o processo de diminuição das doses dos trabalhadores e é evidente que a proteção radiológica deverá perseguir o valor do nível de registro para todos os trabalhadores.

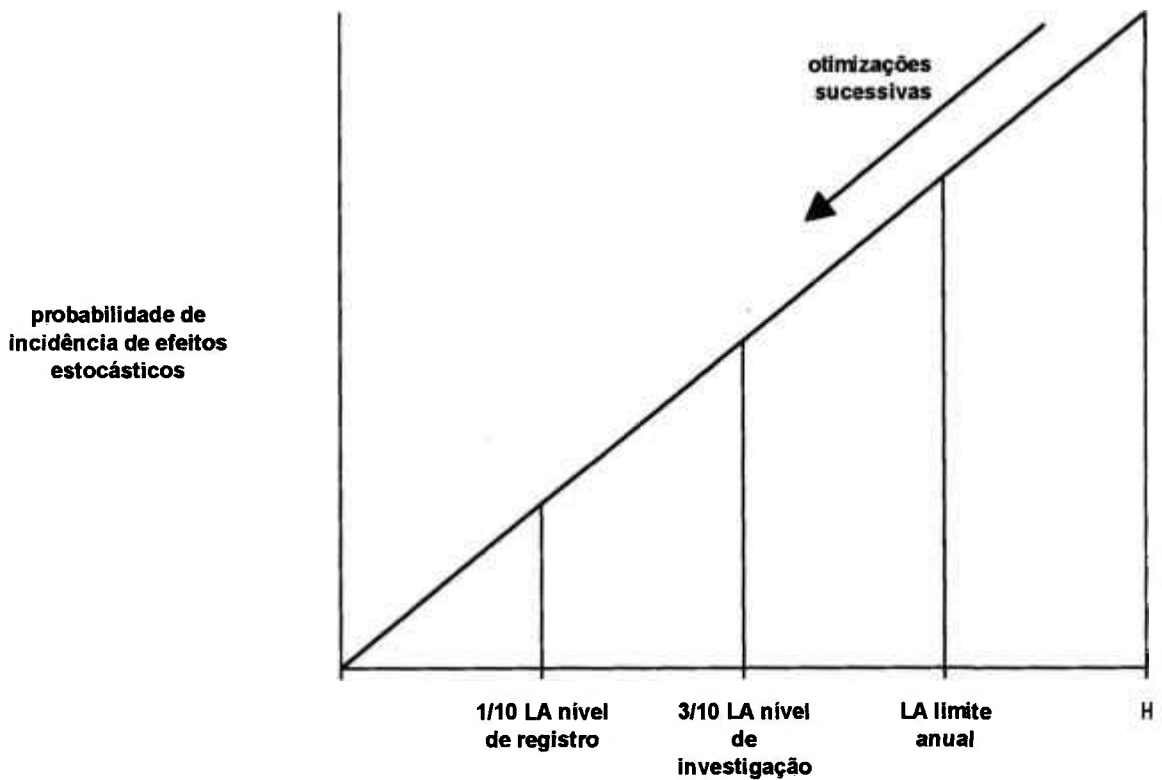


Figura 1 - Processo de diminuição das doses anuais dos trabalhadores

Para diminuir o número de otimizações sucessivas principalmente quando se está acima dos 3/10 é possível estabelecer um vínculo de dose e a partir dele descartar de antemão todas as opções de proteção cujas estimativas de dose sejam superiores a estes vínculos. Devemos lembrar que o serviço de proteção radiológica deve perseguir os níveis de radiação até tornarem-se inferiores ao nível de registro.

Os países da Comunidade Européia começaram a implantar esta norma internacional a partir de março de 1980 e foi oficialmente adotada em setembro de 1982

levando 30 meses para ser adequarem a ela ⁽¹²⁾. Em 1990 todos os trabalhadores tinham doses anuais inferiores a 3/10 com exceção de duas atividades: o cateterismo digitalizado e os trabalhos em minas de urânio subterrâneas. Em virtude deste fato em 1991 a CIPR lançou a sua publicação de número 60 ⁽¹³⁾ a qual recomenda que o limite anual de **dose equivalente efetiva** para trabalhadores não exceda **0,05Sv** e que no total de 5 anos consecutivos não exceda **0,10Sv**. Assim sendo, é interessante que o trabalhador não exceda o limite de **0,02Sv/ano**.

Esse **0,02Sv/ano** é consequência do fato de que os erros cometidos na medidas das doses equivalentes próximas a este valor são de 25%, portanto os 3/10 do limite anual em uso são de **0,015Sv** mais ou menos 0,04, arredondados para **0,02Sv**. Desta maneira, é obrigatório que as doses nos trabalhadores sejam mantidas inferiores aos 3/10 dos limites anteriores. Evidentemente, ainda que as normas tenham sido mudadas com a publicação 60 da CIPR ⁽¹³⁾ o processo de otimização continua com o fim de alcançar o nível de registro. Estes novos limites foram adotados pela AIEA em sua publicação Safety Series nº115-I ⁽¹⁴⁾.

Examinando sucintamente o primeiro princípio do sistema de limitação de dose atual em que nenhuma atividade será adotada a não ser que sua introdução produza um benefício líquido positivo, temos a resposta à questão sobre se vale a pena introduzir uma atividade que envolve radiação ionizante quando já existem outras técnicas que não a utilizam e que tem a mesma finalidade. Por exemplo: "vale a pena introduzir a gamagrafia para verificação de solda se existem outras técnicas como ultrassom, já em uso?". Se a introdução da técnica que usa radiação ionizante produzir mais benefícios do que malefícios comparada às outras técnicas, é justificada a sua introdução, caso contrário não. Por este motivo, via de regra, este princípio é de responsabilidade das autoridades governamentais competentes. Isso não significa que não possa ser usada pelos serviços de proteção radiológica quando houver a necessidade de optar entre duas ou mais técnicas. Este tipo de análise para a escolha de uma determinada técnica dentre

várias já é conhecida e usada em outros campos do conhecimento humano. Ela é conhecida como Análise Custo-Benefício e pode ser definida como aquela análise que tem o propósito de justificar a presença de uma dada fonte de radiação considerando seus efeitos totais positivos e negativos bem como avaliar procedimentos alternativos. A equação usada em proteção radiológica para este tipo de análise é relativamente simples e é expressa como:

$$B = V - (P + X + Y) \quad (1.1)$$

onde:

B é o benefício líquido;

V é o benefício bruto;

P é o custo de produção básica desde o projeto até a completa eliminação da fonte de radiação;

X é o custo para alcançar o nível de segurança selecionado;

Y é o custo do detrimento total.

Por enquanto fica entendido como custo do detrimento total o custo do dano biológico total provocado pela introdução de uma fonte de radiação. Para a atividade com radiação ionizante ser aceita, evidentemente o benefício líquido deve ser maior do que zero senão a atividade será proibida. Fica entendido como benefício o benefício à sociedade ou segmentos da sociedade auferidos com a introdução desta atividade e o detrimento a todos aqueles que venham sofrer danos biológicos em consequência desta atividade independentemente se auferem ou não benefícios. Disso imediatamente temos duas consequências. A primeira é que o dano biológico individual é estendido para uma coletividade, a que vem sofrer o dano, e em segundo lugar que se estabelece um custo, isto é, um preço ao dano biológico imposto àquela fração da sociedade que o receberá. O custo deste dano biológico, chamado de detrimento por unidade de dose, é conhecido como fator α . Desta maneira é necessário que se

introduzami novos conceitos que extrapolam a dose e o dano biológico associado a um indivíduo para a dose e o dano biológico associado a uma coletividade. Esses conceitos serão discutidos no próximo item.

1.3 - Conceito de detrimento e dose coletiva

O detrimento, G , na população é definido como o valor esperado (conceito matemático) do dano provocado por uma dose de radiação considerando-se não unicamente as probabilidades de cada tipo de efeito deletério, mas também a gravidade dos efeitos. Assim, se p_i é a probabilidade de sofrer o i -ésimo efeito cuja gravidade é expressa por um fator de ponderação g_i , então o detrimento G_k num grupo k composto por N_k pessoas é:

$$G_k = N_k \sum_i p_{i,k} g_{i,k} \quad (1.2).$$

A dose absorvida coletiva S_k^D sobre um grupo k constituído de N_k pessoas que receberam, cada uma delas, uma **dose absorvida** média $\bar{D}_k$ é dada por:

$$S_k^D = N_k \bar{D}_k$$

Do mesmo modo podemos definir a dose equivalente coletiva sobre o grupo k como sendo:

$$S_k^H = N_k \bar{H}_k \quad (1.3)$$

onde $\bar{H}_k$ é a **dose equivalente** média.

Estamos agora em condições de achar a relação entre o detrimento e a dose equivalente coletiva num grupo k .

Sabemos pela equação (1.2) que o detrimento no grupo k pode ser escrito como:

$$G_k = N_k \sum_i p_{i,k} g_{i,k}$$

Pela hipótese da linearidade de cada efeito deletério com relação à dose podemos escrever $p_{i,k} = r_{i,k} \bar{H}_k$ onde $r_{i,k}$ é o coeficiente de probabilidade de risco do i -ésimo efeito sobre o grupo k e $\bar{H}_k$ é a **dose equivalente** média recebida por cada indivíduo do grupo k . Substituindo esta última na expressão do detrimento acima escrita vem:

$$G_k = N_k \sum_i r_{i,k} \bar{H}_k g_{i,k} = N_k \bar{H}_k \sum_i r_{i,k} g_{i,k}$$

mas pela equação (1.3) temos $S_k^H = N_k \bar{H}_k$, que substituído na expressão anterior vem:

$$G_k = S_k^H \sum_i r_{i,k} g_{i,k} \quad (1.4)$$

onde a somatória é uma constante independente da dose equivalente coletiva S_k^H .

Os valores $r_{i,k}$ e $g_{i,k}$ podem em alguns casos depender de propriedades tais como a distribuição etária do grupo k , mas é frequentemente possível adotar um conjunto de valores comuns r_i e g_i para todas as sub-populações de interesse e portanto torná-los independentes do grupo k .

As publicações 27 e 45 da CIPR (15, 16) tratam destas constantes e mostram como podem ser avaliadas.

CAPÍTULO 2

CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Principais técnicas de ajuda para a tomada de decisão adotadas atualmente

Em 1983 a CIPR em sua publicação de número 37 ⁽¹⁷⁾ desenvolve técnicas de análise custo-benefício e análise diferencial custo-benefício aplicadas à proteção radiológica, fornecendo vários exemplos.

Ela mostra também que, para efeito de otimização, considerar unicamente os parâmetros custo da proteção e detrimento biológico, como vinham sendo utilizados até então, nem sempre é suficiente. A necessidade de outros parâmetros fica evidente se perguntarmos, por exemplo:

- 1 - É preferível, do ponto de vista da otimização ter poucos indivíduos irradiados com doses próximas aos limites anuais ou ter muitos indivíduos com pequenas doses para uma mesma dose coletiva?
- 2 - Devem ser considerados os custos do desconforto provocado pelo uso dos equipamentos de proteção individual (EPI) ou pelo uso de um sistema de ventilação?

Se considerarmos parâmetros deste tipo, evidentemente que as técnicas mencionadas acima devem ser modificadas, uma vez que não comportam mais do que os dois parâmetros já citados. Neste caso, a CIPR publicação 37 ⁽¹⁷⁾ introduz a análise custo-benefício expandida com possibilidades de acrescentar um ou dois parâmetros a mais, desde que estes sejam funções lineares ou soma de funções lineares.

Em 1989 a publicação de número 55 da ICRP (18), além de fazer uma remissiva das técnicas apresentadas na publicação 37(17), introduz as duas seguintes técnicas:

- Análise de prioridades com **atributos** múltiplos;
- Análise com **critérios** múltiplos excedentes.

A análise de prioridades com **atributos** múltiplos possibilita a introdução de tantos **atributos** quantos se queira e, contrariamente às análises anteriores, aceita **atributos** com funções de qualquer tipo, como por exemplo, exponenciais, logarítmicas, quadráticas, etc. Todas estas técnicas que acabamos de mencionar, são conhecidas como técnicas agregativas, 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.

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.

É preciso que fique evidente a mudança drástica que ocorreu na filosofia de otimização, introduzida de maneira superficial na publicação 37(17) da CIPR e consagrada na publicação 55(18). O uso das técnicas de análise custo-benefício só admite dois parâmetros: os custos de proteção radiológica e os custos de detrimento biológico. Na análise custo-benefício expandida, a técnica possibilita a introdução de mais um ou dois parâmetros, desde que sejam lineares e não é necessária quantificação

completa. Com as duas técnicas mais recentes, ou seja, a análise de prioridades com **atributos** múltiplos e a análise com **critérios** múltiplos excedentes, foram introduzidos definitivamente os **fatores** qualitativos e em qualquer número. O valor e a importância desses **fatores** qualitativos com relação àqueles quantificáveis é completamente subjetivo, e portanto, a análise que era essencialmente técnica deixou de ser. Desta maneira, a opção ótima passa a depender da escolha dos valores e da importância dada aos **fatores** qualitativos, e portanto, pode ser conduzida para o resultado desejado pelo executor da análise, daí ser o título da publicação 55 ⁽¹⁸⁾ da CIPR "Otimização e tomada de decisão em proteção radiológica". Estas análises, antes essencialmente técnicas, evoluíram para uma nova metodologia na qual fica evidenciado o caminho percorrido pelo seu executor para chegar à opção ótima, escolhida por ele.

A norma CNEN-NE-3.01 ⁽¹¹⁾, em seu item 5.4.1, obriga que os sistemas de radioproteção de uma instalação estejam otimizados, e no item 5.4.2 exige que "para demonstrar que um sistema de radioproteção está otimizado devem ser detalhadas, a juízo da CNEN, as **opções** tecnicamente disponíveis" e no item 5.4.2.1 exige que "em cada caso, deve ser determinado o custo da **opção**, incluindo o custo da instalação e da operação durante a vida útil do seu sistema". Estes itens são necessários, uma vez que a mesma **opção de proteção** radiológica, julgada ótima pelo interessado, pode não ser julgada ótima pela CNEN.

2.2 - Descrição das técnicas de ajuda para a tomada de decisão

2.2.1 - Introdução

Conforme mencionado anteriormente, item 1.2, o benefício líquido B, de um produto ou uma operação que implique numa irradiação pode ser expresso pela equação (1.1).

A otimização segundo o princípio mencionado no fim do item 1.1 exige que B seja máximo, $B_{\text{máx}}$. Para uma particular operação ou produto que implique em irradiação, podemos considerar o benefício bruto V e o custo de produção básica P constantes, pois são conhecidos pela atividade que queremos introduzir, e então devemos escolher X e Y com o intuito de tornar máximo o benefício líquido B. Este máximo é obtido quando a soma de X e Y for mínima, isto é:

$$(X+Y)_{\min} \quad (2.1)$$

A este tipo de análise é também conveniente aplicar-se dois vínculos. O primeiro destes é impor que seja obedecido o limite de dose para todos os indivíduos. Este vínculo limita o detrimento em qualquer indivíduo tomado isoladamente e isto se torna necessário se os benefícios e detrimientos são somados sobre grupos diferentes de indivíduos, isto é, se o grupo que recebe os benefícios não é exatamente o mesmo que recebe o detrimento.

O segundo vínculo é imposto pela necessidade do benefício líquido ser positivo, isto é, $B > 0$, de modo que exista sempre um ganho líquido pela comunidade obtido pela operação ou produtos propostos e o princípio da justificativa, citado no fim do item 1.1, seja satisfeito.

No processo geral de análise diferencial custo-benefício o próximo passo é o de tornar máximo o benefício líquido com a escolha de diferentes técnicas operacionais, o que tornaria V e P variáveis. Contudo, como a intenção é interpretar o princípio básico de "manter as doses tão pequenas quanto razoavelmente exequível;

tomando-se em conta parâmetros econômicos e sociais" consideraremos que a técnica operacional já foi escolhida e portanto V e P são constantes.

Desta maneira, trabalhamos unicamente com a soma do detrimento imposto ao grupo de indivíduos afetados e com o custo para alcançar o nível de segurança selecionado, para tornar máximo os benefícios de uma dada técnica operacional ou grupo de técnicas operacionais. Teoricamente, então, o benefício líquido será máximo quando nenhum benefício líquido adicional for obtido com a variação do valor de dose equivalente coletiva, S.

2.2.2 - Análise Diferencial Custo-Benefício

Diferenciando a equação (1.1) com relação a S, que é a variável independente tanto para o custo de proteção como para o detrimento, temos:

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

O valor do benefício bruto V à sociedade e o custo desta atividade P (exceto o custo relativo à radioproteção) são independentes do nível de proteção e conseqüentemente independentes do valor de dose equivalente coletiva, portanto:

$$\frac{dV}{dS} = 0 \text{ e } \frac{dP}{dS} = 0 \text{ e a equação se reduz a:}$$

$$\frac{dB}{dS} = \frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} = 0 \quad \text{ou} \quad -\frac{dX}{dS} = \frac{dY}{dS} \quad (2.2)$$

A equação (2.2) traduz que o benefício líquido máximo é obtido quando um incremento infinitesimal no custo da radioproteção corresponde a uma diminuição igual no custo do detrimento à população e vice-versa. No item 1.1 foi citada uma relação linear entre dose e efeito biológico, isto é o mesmo que supor uma relação linear entre a variação de detrimento na saúde e a variação da dose equivalente coletiva. Neste caso podemos dizer que a um incremento no compromisso de dose equivalente coletiva corresponde um incremento linear no custo do detrimento de Y, isto é:

$$-\frac{dX}{dS} = \frac{dY}{dS} = \alpha \quad (2.3)$$

onde : α expressa o custo do detrimento por unidade de dose equivalente coletiva.

Esta técnica, como podemos perceber, trata os termos da proteção X e detrimento Y como funções diferenciais, e por este motivo é conhecida como análise diferencial custo-benefício. O sinal de menos que acompanha o custo diferencial de proteção é justificado pelo fato de que se aumentarmos o custo do detrimento, diminuiremos o custo de proteção e vice-versa, ou seja, se uma função é crescente a outra é decrescente e vice-versa.

2.2.3 - Análise Custo-Benefício

A análise custo-benefício originou-se da teoria econômica do bem estar, e representa a mais velha e talvez a mais direta e quantitativa ajuda na decisão em uso corriqueiro para comparar os benefícios e os danos associados com diferentes cursos de uma ação ⁽¹⁸⁾.

Uma característica principal da análise custo-benefício é que os **fatores** que influenciam uma decisão são, normalmente, expressos em termos monetários. O foco encontra-se nas medidas monetárias agregadas aos custos e benefícios associados com as diferentes opções, com o objetivo de identificar a opção que tem agregado mínimo $(X+Y)_{\min}$ (2.1).

Partindo da equação (2.3), podemos escrever:

$$\frac{dY}{dS} = \alpha \quad \text{ou} \quad dY = \alpha dS$$

e integrando ambos os membros:

$$\int dY = \alpha \int dS \quad \text{ou} \quad Y = \alpha S + d$$

Quando a dose equivalente coletiva for nula, o custo do detrimento também será nulo e portanto d é nulo e a equação será:

$$Y = \alpha S \quad (2.4)$$

Desta maneira a equação (2.1) pode ser escrita como:

$$(X + \alpha S)_{\min}$$

conhecida como equação custo-benefício para uso em otimização.

Como descritos nas publicações da CIPR-22⁽⁷⁾, 26⁽⁸⁾ e 55⁽¹⁸⁾ se os únicos **fatores** diretamente relevantes para os propósitos de otimização são os custos financeiros das medidas protetoras a serem implantadas e os níveis de dose coletiva associados, então, uma análise custo-benefício simples pode ser implementada transformando a dose coletiva num valor monetário fazendo uso do valor de referência da dose coletiva unitária α . No Brasil, α equivale a US\$10.000/Sv pessoa⁽¹¹⁾. A análise então procede pela soma do custo de proteção X , e o custo do detrimento Y , de modo a obter um custo total $(X + \alpha S)$.

A solução analítica corresponde, então, à **opção** com o menor custo total. Por ser a análise concernente com o custo total, qualquer custo comum a todas as **opções** é estritamente irrelevante para a escolha da proteção ótima, contudo, na prática, a fração do custo total da instalação pode ser um outro fator relevante na decisão final. Porém, este fator não pode entrar, pela técnica de custo-benefício, de maneira

quantitativa. Somente pode ser feita uma análise qualitativa após se ter obtido a solução analítica. Na análise custo-benefício expandida, este **fator** poderá ser quantificado desde que sua variação seja descrita por uma função linear, como veremos a seguir.

2.2.4 - Análise Custo-Benefício Expandida

A técnica de análise custo-benefício é estritamente limitada a comparações quantitativas entre os custos de proteção e a dose coletiva. A fim de incluir outros **fatores** relevantes na técnica analítica é possível estender o quadro inicial da análise custo-benefício⁽¹⁸⁾.

Um dos **fatores** de proteção radiológica visto como um propósito relevante na tomada de decisão é se as doses individuais são grandes ou pequenas. Isto pode ser expresso como uma diferença entre uma dose coletiva originada de um grande número de doses individuais pequenas e a mesma dose coletiva para uma pequena população exposta a níveis maiores, especialmente aqueles que se aproximam aos limites de dose.

Para incorporar este julgamento via análise custo-benefício expandida, um método é modificar o valor dado à dose coletiva unitária. O valor básico (ou termo α) deve ser substituído por outros termos na avaliação do custo do detrimento. Valores diferentes devem ser dados à dose coletiva unitária dependendo dos níveis de dose individuais envolvidos.

Esta nova componente no custo do detrimento pode ser expressa por um termo adicional introduzido pela Comissão na CIPR 37⁽¹⁷⁾ e mais tarde definida numa forma simplificada na CIPR 42⁽¹⁹⁾ como:

$$Y = \alpha S + \sum_j \beta_j S_j$$

onde:

- S_j - É a dose coletiva originada de uma dose per caput H_j liberada em N_j indivíduos do j -ésimo grupo
- β_j - É o valor monetário adicional, atribuído pelo "tomador de decisão", dado à dose coletiva unitária no grupo j -ésimo.

A título de exemplo, podemos para o fator de distribuição de doses individuais adotar como critério adicional o uso dos termos beta como segue:

$$\beta_1 \rightarrow (< 5 \text{ mSv}) = \text{US\$ } 0 \text{ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

$$\beta_2 \rightarrow (5 - 15 \text{ mSv}) = \text{US\$ } 40.000 \text{ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

$$\beta_3 \rightarrow (15 - 40 \text{ mSv}) = \text{US\$ } 80.000 \text{ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

$$\beta_4 \rightarrow (40 - 50 \text{ mSv}) = \text{US\$ } 120.000 \text{ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

onde β_1 abarca o intervalo de doses inferiores ao nível de registro, β_2 o intervalo onde a monitoração individual não é necessária, β_3 o intervalo em que temos certeza de que as doses são inferiores ao limite anual considerando o erro na medida e β_4 o intervalo de doses inferiores ao limite anual mas que se forem considerados os erros na medida pode deixar dúvidas de que as doses realmente tomadas sejam inferiores aos limites anuais.

O custo do detrimento Y , é então a soma do termo α levando em conta a dose coletiva e os termos β levando em consideração a distribuição da dose individual, mostrado no exemplo.

É possível estender o quadro custo-benefício para incluir outros **fatores** relevantes. Por exemplo, pode ser julgado relevante diferenciar entre diferentes tipos de população irradiada, tal como público e trabalhadores.

Neste caso podem ser acrescentados diferentes componentes ao valor básico da dose coletiva unitária para doses aos dois grupos, refletindo julgamentos sobre o significado relativo da irradiação laboral e do público. O quadro poderia, também, ser estendido para diferenciar entre as irradiações rotineiras que surgem de operações normais e aquelas que resultem de acidentes.

Quando os **fatores** relevantes são muito numerosos, ou se os julgamentos dos **critérios** concernentes a alguns **fatores** relevantes são difíceis de serem quantificados em termos monetários, não é apropriado o uso de técnicas de custo-benefício mesmo do tipo expandido.

Em decisões mais complexas envolvendo muitos **fatores**, pode ser mais apropriado o uso de uma técnica alternativa de ajuda na decisão como a de prioridade com **atributos** múltiplos.

2.2.5 - Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos

Esta maneira de encarar o assunto evoluiu de várias disciplinas incluindo a psicologia, a engenharia e a ciência gerencial, e é uma técnica amplamente aplicável para tomada de decisão. Em particular, ela pode superar os problemas da inclusão de **fatores** difíceis de serem quantificados em termos monetários (18).

A essência desta técnica é usar um esquema de fazer pontos para os **fatores** relevantes ou uma função de prioridade com **atributos** múltiplos, dessa maneira

se os pontos para a opção i forem superiores àqueles da opção m então, por definição, i tem preferência sobre m , com a propriedade de que, se os pontos forem iguais para duas opções, não existe nenhuma preferência de uma sobre a outra.

Uma vez especificados os **fatores** de proteção radiológica relevantes (ou **atributos**), a serem incluídos no estudo de otimização, e quantificadas as consequências de cada opção da proteção em termos destes **fatores**, o analista deve incorporar os **critérios** para relacionar a importância relativa dos **fatores** na análise das opções. Isto é levado a efeito por meio de uma função de prioridade, u_j , que fornece a conveniência relativa do possível resultado para o fator j .

Geralmente, ao melhor resultado ou à consequência de menor adversidade para cada fator (por exemplo custo mais baixo, dose coletiva mínima) é atribuída uma prioridade $u_j = 1$ e à pior consequência uma prioridade $u_j = 0$.

A flexibilidade destas funções de prioridade permitem, também, a introdução de **fatores** em termos monetários, que são difíceis de serem quantificados, ainda que devam sê-lo como é exigido na análise custo-benefício.

A partir das funções de prioridades simples, u_j , expressando as várias prioridades dos n **fatores** associados a cada **opção de proteção**, i , deve ser obtida uma função com **atributos** múltiplos, U_i .

Esta função fornece a figura de mérito ou "prioridade total" de cada opção, i . Quando as preferências para os diferentes **fatores** forem todas independentes, a função prioridade com **atributos** múltiplos pode ser expressa numa forma aditiva como mostrado a seguir:

$$U_i = \sum_j k_j u_j$$

onde:

- k_j é uma constante de crescimento que expressa a importância relativa ou elemento de ponderação atribuído a cada fator j .

Estas constantes de crescimento, geralmente, são normalizadas de modo que $\sum k_j = 1$. Quanto maior for a figura de mérito, U_i , maior a posição global da opção, de modo que a solução analítica será a opção que torna U máximo.

A título de elucidação sobre as técnicas, até aqui mencionadas, daremos um exemplo formulado na própria publicação 55 da CIPR (18). Vamos fazer uma análise de otimização na compra de um carro. Para tanto podemos utilizar os seguintes parâmetros: preço, custo de manutenção, eficiência em combustível e preço de revenda após determinado período de uso. Para limitar o número de marcas e modelos de carros existentes, podemos impor um **critério**, isto é, um vínculo, qual seja, verba disponível.

As técnicas de análise mencionadas neste trabalho, admitem **critérios**. Os **atributos** selecionados acima são todos quantificáveis. Os preços são conhecidos; o valor da manutenção pode ser calculado por meio das revisões regulares e consertos, feitos em oficinas autorizadas; a eficiência em combustível pode ser assumida como um valor médio e o preço de revenda também é conhecido, em função do ano de fabricação. Portanto, a análise será essencialmente técnica. Se, por outro lado, introduzirmos na análise novos **atributos**, por exemplo, a aceleração desejada para ultrapassagem, o arranque nos primeiros 100 metros, a velocidade alcançada, a cor da pintura, os acessórios, etc, teremos parâmetros de caráter qualitativo (subjetivos), e o resultado do carro ótimo dependerá do valor e da importância que atribuiremos a estes **atributos** com relação aos anteriores, completamente quantificáveis. Desta maneira estaremos

avaliando o carro de acordo com a nossa própria atitude em relação a estes **atributos**, e portanto, os negociaremos usando nossos **critérios** pessoais. Em virtude disto, a tomada de decisão é diferente para diferentes pessoas. No primeiro caso em que todos os termos são quantificáveis, as técnicas mais simples como análise diferencial custo -benefício ou análise custo-benefício resolverão o problema, mas no caso dos termos qualitativos teremos que partir para técnicas mais complexas como a análise custo-benefício expandido se forem acrescentados mais um ou dois **fatores** e análise de prioridade com **atributos** múltiplos se forem acrescentados muitos **fatores**.

2.3 - Estruturação dos problemas

Para que se possa garantir que nenhum dos aspectos importantes do problema seja omitido e também para que se possa registrar a análise possibilitando assim o acesso à informação por outras pessoas, é importante adotarmos uma abordagem estruturada da otimização da proteção.

A Figura 2 ⁽¹⁸⁾ nos mostra os principais passos no procedimento a ser seguido:

- Reconhecimento da necessidade de um estudo de otimização e a definição clara da finalidade do estudo;
- Identificação e quantificação dos **fatores** a serem considerados durante a otimização e a separação deles naqueles relevantes para a proteção radiológica e em outros;
- Análise (qualitativa ou quantitativa) do desempenho das opções com relação a cada um dos **fatores** considerando os **critérios**, preferencialmente estabelecidos explicitamente;
- Geração de uma opção ótima recomendada pela análise;
- Conclusões quanto a que ações devam ser tomadas e a decisão final que pode levar em conta outros **fatores** além da proteção radiológica, bem como **fatores** que serão tratados

qualitativamente para as técnicas mais simples que não aceitam outros **fatores** além do custo de proteção X e custo de detrimento Y.

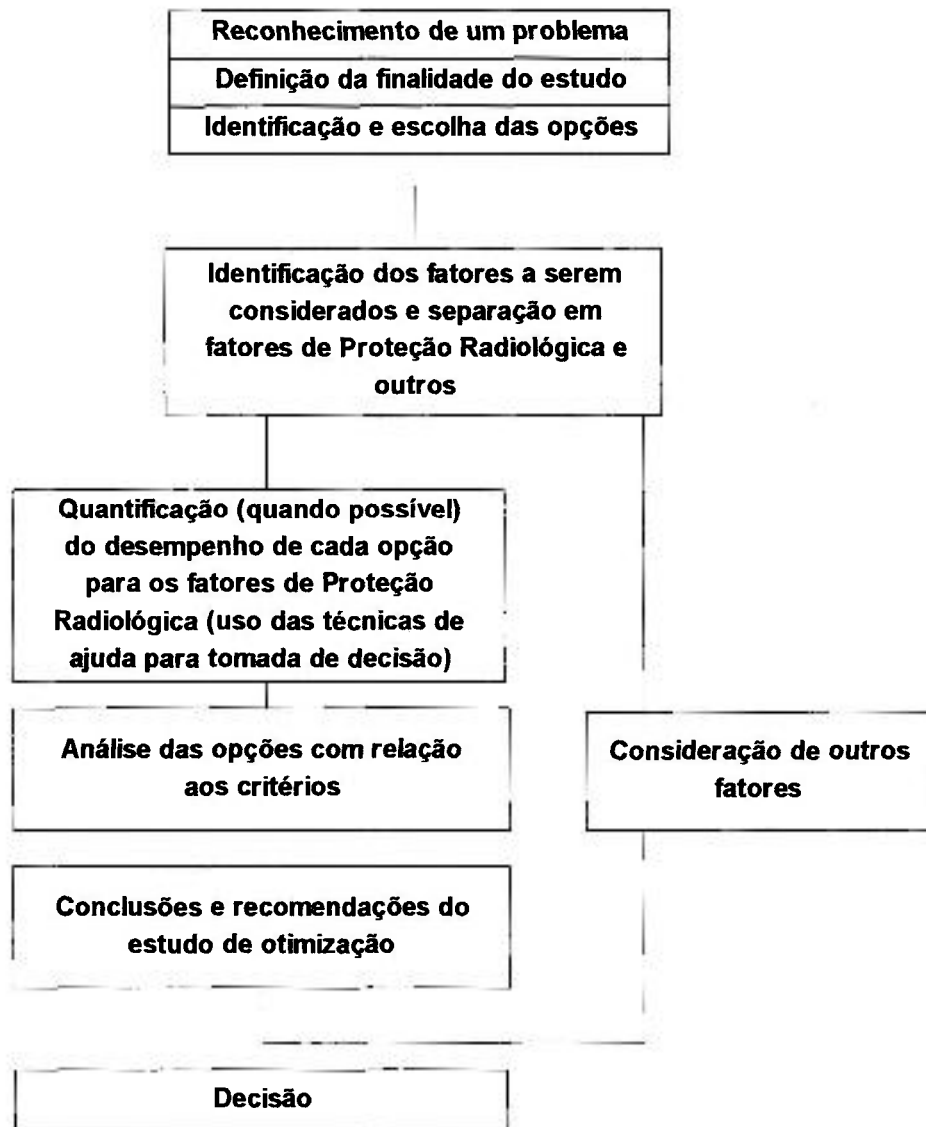


Figura 2 - Modelo Estruturado para a Otimização da Proteção no Contexto da Tomada de Decisão

2.4 - Custos de proteção

Os custos de proteção radiológica compreendem todos os esforços feitos no sentido de se obter níveis de radiação ótimos, tais esforços são normalmente expressos em termos monetários. Este custo é o resultado da soma entre o custo de capital do sistema de proteção radiológica e o custo de operação deste sistema. A CIPR em sua publicação 37⁽¹⁷⁾ apresenta os três métodos a seguir para o cálculo destes custos.

(a) Estimativa do Custo Bruto que é freqüentemente usado em análises de investimentos no setor privado quando existe incerteza no risco. A estimativa do custo bruto de uma instalação com um custo de capital inicial, X_c , e um custo anual de operação, X_w , é dado por: $X = X_c + X_w \tau$ onde τ é a vida útil da instalação. Este custo ou uma análise anual do custo, pode então ser comparado com os benefícios gerados durante o tempo τ para saber se existe um benefício líquido.

(b) Valor Presente é uma técnica utilizada para comparar custos incorridos em instantes distintos. Uma quantia X_f , n anos a partir de uma data de referência equivale nesta data a uma outra quantia expressa na forma: $X_p = X_f / (1+\gamma)^n$ onde γ é a taxa de juros.

(c) Anualização dos custos é uma alternativa para o cálculo do valor presente, onde se assume que um empréstimo financeiro para a compra, instalação e operação de sistemas de proteção radiológica, será pago anualmente. Em vez de reduzir os benefícios ocorridos durante o tempo a um valor em um tempo zero, a anualização divide o custo do capital na vida útil da instalação o qual será somado ao custo anual de operação e manutenção. O valor do pagamento anual pode ser calculado usando o fator de capital, $C_{n\gamma}$, definido como o inverso do fator de anuidade.

$$C_{n\gamma} = a_{n\gamma}^{-1} = \gamma(1+\gamma)^n / [(1+\gamma)^n - 1]$$

Este fator é multiplicado pelo custo de capital inicial. O pagamento anual, X_a , requerido para pagar o custo do capital, X_p , em n anos com uma taxa de juros γ , será:

$$X_a = X_p \gamma(1+\gamma)^n / [(1+\gamma)^n - 1]$$

2.5 - Termo alfa

Para todas as técnicas de ajuda para a tomada de decisão discutidas neste capítulo o valor de alfa é extremamente importante, é fundamental que seu significado seja bem entendido e esclarecido e é justamente o que se tentará fazer aqui.

O custo do detrimento pode ser escrito como:

$$Y = \varepsilon G$$

onde:

G é o detrimento definido no item 1.3 equação 1.4.

ε é o custo do detrimento unitário.

Substituindo-se o detrimento dado na equação 1.4 na equação acima vem:

$$Y = \varepsilon S^H \sum_i r_i g_i$$

Por outro lado, da equação 2.4 temos $Y = \alpha S^H$ de onde se tira que:

$$\alpha = \varepsilon \sum_i r_i g_i$$

Pela publicação 60 da CIPR⁽¹³⁾ $\sum_i r_i g_i = 0,88 \text{ Sv}^{-1}$ e portanto, $\alpha = 0,88 \varepsilon$.

O valor de ε é dado pelo Produto Nacional Interno Bruto per capita. Um trabalho realizado no Brasil⁽²⁰⁾ mostra que o valor de α no nosso país seria equivalente a US\$3.000,00 (Sv-pessoa)⁻¹, mas a norma CNEN-NE-3.01⁽¹¹⁾ que é anterior a este trabalho adotou o valor médio mundial adotado pela Agência Internacional de Energia Atômica para os países que não efetuaram o cálculo e que é equivalente a US\$10.000,00 (Sv-pessoa)⁻¹. O maior valor de alfa atualmente em uso é aquele adotado pelo Japão igual a US\$25.000,00 (Sv-pessoa)⁻¹. Os Estados Unidos e a Comunidade Européia adotam US\$20.000,00 (Sv-pessoa)⁻¹⁽²¹⁾.

Neste caso se torna importante o estudo, que se convencionou chamar de sensibilidade dos parâmetros, tomando o valor de alfa desde o valor mínimo de US\$3.000,00 adotado internacionalmente pela AIEA por convenção com os países membros da ONU até o valor máximo de US\$25.000,00, para verificar se a opção ótima de proteção se mantém sempre igual ou se muda de opção. Este estudo de sensibilidade

pode ser feito também com os demais **critérios** e **atributos** em função de seus intervalos de variação.

O estudo de sensibilidade visa mostrar a robustez da opção ótima (solução analítica) com a variação do **fator** ou **critério**, como no caso do α , em apreço. Se no intervalo de variação do **fator** ou **critério** selecionado em exame a solução analítica, **opção** ótima, não varia, significa que a solução é robusta para aquele **fator** ou **critério** e caso contrário pode significar que uma pequena variação no valor do **fator** ou **critério** é suficiente para deslocar a solução analítica para outras opções e portanto a opção ótima é de frágil manutenção.

2.6 - ORIGIN E ISOSHL D

2.6.1 - Código ORIGIN 2⁽²²⁾

O ORIGIN 2 é um código para computadores usado para os cálculos de **queima** (burn-up), decaimento e processamento de materiais radioativos. Incorpora dados de modelos de reator, seção de choque, produtos de fissão e decaimentos.

Utiliza o método de matriz exponencial para resolver sistemas lineares, diferenciais de primeira ordem com coeficientes constantes.

Com o código ORIGIN 2, foi calculado o inventário fissil de miniplacas de UO_2 com **queima** de 50% do nuclídeo U-235 sob fluxo constante no reator de pesquisa IEA-R1 para diferentes tempos de resfriamento. Os dados obtidos foram introduzidos no código ISOSHL D, discutido a seguir, com a finalidade de se determinar diferentes espessuras de blindagem para diferentes valores de dose.

2.6.2 - Código ISOSHLD (23)

O código ISOSHLD calcula a **taxa de exposição**, em C/kg.h, para os raios γ de decaimento e "Bremsstrahlung" no exterior de uma fonte de radiação blindada, integrando numericamente o **Cerne de Atenuação Puntiforme** (fator de crescimento (build-up) $\times$ atenuação puntiforme + fator geométrico) sobre o volume da fonte para 25 grupos de energia.

O fator de crescimento é característico da última região de blindagem (ou de uma região diferente, quando necessário) mas, depende do número total de **caminhos livres médios** desde a fonte até o ponto de interesse. Para o fator de crescimento o código faz uso, para uma fonte puntiforme isotrópica, da fórmula de Taylor . Os **coeficientes de atenuação de massa** são obtidos de uma biblioteca de dados especificando-se, como entrada, a densidade do material e o identificador do material na biblioteca. A intensidade da fonte pode ser especificada como:

- emissões de um inventário proveniente do combustível irradiado sobre condições específicas;
- Becquereis de produtos de fissão e/ou ativação;
- número de fótons/seg com energia E especificado como entrada.

Pode-se também especificar uma distribuição exponencial em intensidade da fonte para as geometrias aplicáveis.

CAPÍTULO 3

CÁLCULOS DE OTIMIZAÇÃO

3.1 - Descrição do problema

3.1.1 - Finalidade e objetivos do presente estudo

O presente trabalho tem a finalidade de mostrar que a autora tem:

- a) o conhecimento das principais técnicas de ajuda para a tomada de decisão usadas na otimização da Radioproteção,
- b) a capacidade de escolher os **fatores e critérios** relevantes para diferentes situações e demonstrá-lo para uma situação específica,
- c) a habilidade de interpretar a importância relativa dos **fatores e critérios**, alguns deles difíceis de serem quantificados,
- d) a destreza de discutir os resultados ressaltando os pontos robustos e fracos na situação específica examinada.

Para alcançar a finalidade proposta, pretende-se levar a termo os seguintes objetivos que comprovarão a obtenção da finalidade.

1 - Formalizar a otimização, sob o ponto de vista da Proteção Radiológica, de um projeto, real e interno do CTMSP, de instalação composta por duas celas blindadas onde serão manipuladas miniplacas de UO_2 com 50% de queima do nuclídeo U-235, irradiadas sob fluxo constante no reator de pesquisa IEA-R1. Em cada cela será manipulada apenas uma placa por vez.

- 2 - Especificar os **fatores** e **critérios** que podem ser de interesse nos cálculos de otimização para fins de radioproteção e identificar aqueles que são relevantes para o caso específico descrito no item 1.
- 3 - Mostrar as técnicas em uso para evidenciar a importância relativa de cada fator e critério usados nas diferentes opções de radioproteção para as diferentes técnicas de ajuda para a tomada de decisão e aplicá-las ao caso específico descrito em 1.
- 4 - Evidenciar os **fatores** qualitativos e a maneira como podem ser levados em consideração na decisão a partir da solução analítica.
- 5 - Mostrar como os **fatores** qualitativos podem ser quantificados para participarem da solução analítica.
- 6 - Efetuar os estudos de sensibilidade dos **fatores** e **critérios** usados na situação descrita em 1 para a verificação da robustez e fragilidade da solução analítica, mostrando a versatilidade que a autora tem para efetuar este tipo de análise em situações diferentes.
- 7 - Discutir de uma maneira global os resultados apresentados pela situação descrita em 1 para orientar o CTMSP na decisão da opção ótima a ser posta em prática.

3.1.2 - Considerações e identificação dos fatores importantes em proteção radiológica

Os **fatores** e **critérios** julgados importantes para o cálculo da otimização da instalação descrita em 3.1.1 item 1 dos objetivos do presente trabalho, são:

Fatores

- 1 - Sistema de Ventilação
- 2 - Tempo de Resfriamento das Miniplacas
- 3 - Dose Coletiva
- 4 - Distribuição das Doses Individuais
- 5 - Custo de Proteção Radiológica X

1 - Sistema de Ventilação

Embora seja considerado um fator de proteção radiológica, não será abordado nesta análise devido ao fato de o número de renovações de ar já ter sido projetado em função da necessidade de se retirar o calor do ambiente oriundo das várias fontes, tais como lâmpadas e equipamentos, existentes no interior da célula (24).

2 - Tempo de Resfriamento das Miniplacas

Este fator tem por finalidade estudar a redução das espessuras de blindagem em função do aumento do tempo de decaimento dos produtos de fissão, de ativação e dos actínídeos gerados durante a irradiação das miniplacas.

As miniplacas depois de irradiadas somente serão manipuladas após um intervalo de tempo de no mínimo 30 dias que é o tempo necessário para que ocorra o decaimento de elementos de meia vida muito curta e que não interessam aos propósitos do projeto. Após 180 dias de decaimento não se obtém nenhum ganho significativo na redução das espessuras de blindagem. Com base no exposto acima, foram considerados os seguintes tempos de decaimento: 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias.

Para o cálculo do inventário fissil das miniplacas foi utilizado o código de computador ORIGEN-2 (22) . Na Tabela 1, que se encontra no Capítulo 5, são apresentadas as atividades dos principais produtos de fissão, de ativação e dos actínídeos que constituem o inventário fissil das miniplacas para os tempos de decaimento considerados.

3 - Dose Coletiva e Distribuição das Doses Individuais

A definição dos valores de dose coletiva e da distribuição das doses individuais, depende do tempo de utilização e de ocupação da instalação bem como da escolha do intervalo de dose a ser adotado no estudo, conforme segue:

- Tempo de Utilização e de Ocupação da Instalação

Esta instalação possuirá acesso restrito somente aos seus servidores, possuirá um tempo de utilização de 1000 horas/ano e de ocupação de 10 trabalhadores distribuídos da seguinte maneira:

- 4 trabalhadores a 30 cm das celas de manipulação
- 3 trabalhadores a 4 m das celas de manipulação
- 3 trabalhadores a 6 m das celas de manipulação

- Escolha do Intervalo de Dose

A escolha do intervalo de dose foi baseada na filosofia adotada pela CIPR 26⁽⁸⁾, como segue:

- Limite anual de dose equivalente igual a 50 mSv
- Condição de Trabalho A: condições onde a exposição anual exceda a 3/10 do limite anual de dose equivalente e portanto são necessárias monitorações de área e seus trabalhadores estão sujeitos à **monitoração individual com função controladora** (25, 26, 27).
- Condição de Trabalho B: condições onde a exposição anual não exceda a 3/10 do limite anual de dose equivalente e portanto são realizadas apenas monitorações de área.
- Condições de trabalho onde a exposição anual não exceda 1/10 do limite anual de dose equivalente, estão abaixo do nível de registro, portanto podem ser consideradas como

níveis de radiação aceitáveis e portanto será também dispensada a **monitoração de área com função controladora** (25, 26, 27).

- Todas as doses dos trabalhadores inferiores a 1/100 do limite anual de dose equivalente são consideradas nulas para efeito de estudos de otimização.

Os valores intermediários escolhidos foram baseados no erro, de aproximadamente 20%, associado aos detetores de radiação bem como nas condições A e B de trabalho, limite anual para público e limite anual médio para trabalhador adotado pela CIPR 60 (13). No total foram escolhidos 12 valores como segue: 0,0500Sv, 0,0400Sv, 0,0300Sv, 0,0200Sv, 0,0150Sv, 0,0120Sv, 0,0100Sv, 0,0080Sv, 0,0060Sv, 0,0040Sv, 0,0010Sv e 0,0008Sv, valores estes adotados para o grupo de trabalhadores que recebe a maior dose anual.

4 - Custos de Proteção X

Os custos de proteção neste caso dependem da escolha do material de blindagem, da determinação da massa total de material para cada opção, do custo do material de blindagem e do custo do sistema de monitoração da radiação, conforme descritos nos parágrafos seguintes. Por serem os custos de operação e manutenção comuns a todas as opções, não foram considerados. Os custos da blindagem serão anualizados considerando uma vida útil n de 30 anos e uma taxa de juros γ de 12% ao ano. Os custos anualizados do sistema de monitoração da radiação serão somados aos custos anualizados da blindagem conforme mostrado a seguir.

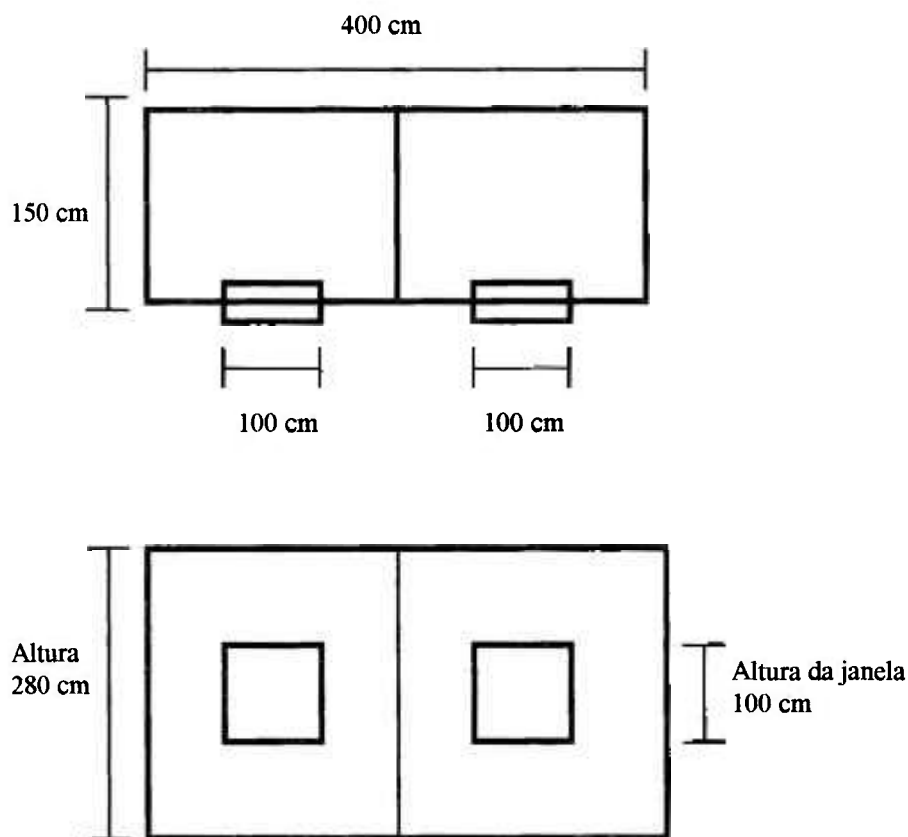
- Blindagens

Para se encontrar os valores mais próximos aos valores de dose escolhidos foi utilizado o programa ISOSHLD⁽²³⁾, no qual foram introduzidos os dados do inventário fissil obtidos pelo programa ORIGEN-2⁽²²⁾. Primeiramente, por meio do programa⁽²³⁾, foi determinada a espessura de parede necessária, tanto para o chumbo quanto para o concreto, para encontrar o valor mais próximo ao limite superior do intervalo, porém como as espessuras encontradas para o concreto, em função do espaço físico disponível, inviabilizaram o seu uso, o material adotado foi o chumbo ($\rho = 11,34\text{g/cm}^3$). Uma vez escolhido o material e determinada a espessura mínima necessária, foram então sendo aumentados os valores de espessura de chumbo em intervalos de 1mm até se chegar a aproximadamente 25% abaixo de 1mSv; este último é o limite recomendado pela CIPR 26⁽⁸⁾ para indivíduos do público. A partir dos valores de dose nas paredes das celas blindadas, foi calculada a contribuição na dose devido ao teto das celas assumindo que esta dose poderia ser no máximo 10% do valor da dose das paredes para os trabalhadores que ficam a 30 cm das celas. A contribuição do teto se deve à dispersão pelo céu “Skyshine”⁽²⁸⁾, realizando os cálculos⁽²⁸⁾ obtivemos a espessura de teto necessária, considerando os trabalhadores que ficam a 30 cm das celas, e os valores de dose a 4 e 6 metros de distância das celas. Desta forma foi possível saber a dose total recebida pelos trabalhadores.

Os valores de dose obtidos para o teto e paredes, bem como as espessuras necessárias são encontrados nas Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 no Capítulo 5.

- Determinação da Massa Total de Material Necessária para cada Opção

As duas celas que foram projetadas em linha, apresentam as seguintes dimensões:



Paredes

O volume total das paredes das celas é dado pela seguinte expressão:

$V = 33 \times 10^4 \cdot e$ e $[\text{cm}^3]$, onde e é a espessura de material para as paredes e 33×10^4 é a superfície total das paredes das celas.

A massa total das paredes é dada pela seguinte expressão:

$M = V \rho 10^{-6} [t]$, onde ρ (11,34 g/cm³) é a densidade do material e 10^{-6} é o fator de conversão de g para t .

Teto

O volume total do teto das células é dado pela seguinte expressão:

$V = 6 \times 10^4 e [cm^3]$, onde e é a espessura de material para o teto e 6×10^4 é a superfície total do teto.

A massa total do teto é dado pela seguinte expressão:

$M = V \rho 10^{-6} [t]$, onde ρ (11,34 g/cm³) é a densidade do material e 10^{-6} é o fator de conversão de g para t.

Com os valores de espessura de parede obtidos com o programa ISOSHL⁽²³⁾ e com os valores de espessura de teto obtidos com o cálculo do “Skyshine”⁽²⁸⁾ para todos os tempos de decaimento, é possível determinar a massa total de material empregada em cada opção de projeto.

- Custo das Blindagens

- Custo do chumbo já em formato de tijolo, US\$ 2.700,00/t, valor fornecido pela BLM, British Lead Mills, que é um fabricante tradicional da Inglaterra e segue as normas AFNOR M62-001, ISO7212 e ISO9404-1.

- Custo da estrutura de aço, US\$ 945,00/t, aproximadamente 35% do custo do chumbo.

- Custo da mão de obra por ser comum a todas as opções não será incluído no cálculo.
- Custo total, US\$ 3645,00/t.

Os custos totais de todas as opções de material (chumbo) são encontrados nas tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 no capítulo 5.

- Sistema de Monitoração da Radiação

Em condições de trabalho A temos a monitoração individual; desta maneira, para todas as opções com valores de dose dentro desta condição serão acrescentados US\$100,00 por pessoa ao custo de proteção que equivale ao custo anual pago pelo sistema de monitoração individual.

Em condições de trabalho B é dispensada a monitoração individual, porém a monitoração de área é mantida para valores superiores a 1/10 do limite anual de dose equivalente. Desta forma, será descontado US\$530,00 de todas as opções que apresentarem valores de dose menores que 0,005Sv/ano . Sendo este valor o custo anualizado do sistema de monitoração de área, assumindo um custo total de US\$3.000,00, vida útil de 10 anos e taxa de juros de 12% ao ano, pelos equipamentos necessários à monitoração.

3.2 - Aplicação das técnicas de ajuda para a tomada de decisão

Neste trabalho são aplicadas as seguinte técnicas:

- Análise Diferencial Custo-Benefício;
- Análise Custo Benefício
- Análise Custo Benefício Expandido
- Análise de Prioridade com **Atributos** Múltiplos.

Para a aplicação destas técnicas ao problema ja descrito foi desenvolvido um programa de computador em linguagem FORTRAN apresentado no apêndice 2.

Os dados de entrada do programa para cada técnica, são apresentados nos itens 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4.

Os resultados obtidos com a aplicação do programa estão apresentados no capítulo 5.

3.2.1 - Análise Diferencial Custo Benefício

Com esta técnica podemos considerar somente dois **fatores** , a saber:

- Custo Anual de Proteção X
- Dose Coletiva S

Para a aplicação desta técnica, para cada tempo de decaimento, foram utilizados os seguintes dados de entrada no programa:

- 1 - número de opções = 12
- 2 - vida útil da instalação $n=30$ anos
- 3 - taxa de juros $\gamma = 12\%$ ao ano

- 4 - custo total da blindagem para cada opção, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7
- 5 - número de trabalhadores = 10
- 6 - dose individual anual de cada trabalhador para cada opção, conforme Tabelas 8, 9, 10, 11, 12 e 13

Aos custos anualizados das blindagens encontrados pelo programa foram implementados os custos do sistema de monitoração da radiação. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 14, 15, 16, 17, 18 e 19 do Capítulo 5.

3.2.2 - Análise Custo Benefício

Com esta técnica podemos introduzir apenas dois **fatores**, a saber:

- Custo Anual de Proteção X
- Dose Coletiva S

Uma das principais características desta técnica é que os **fatores** que influenciam uma decisão são expressos em termos monetários. Assim sendo, foi necessário introduzir o critério α , para transformar a Dose Coletiva em Custo do Detrimento Biológico Y, onde $Y = \alpha S$.

Valor do termo α

O valor adotado para α é de 10.000,00 US\$(Sv-pessoa)⁻¹, pois é o adotado pela norma nacional CNEN-NE-3.01 (11) e recomendado pela CIPR 60(13), conforme item 2.5 do capítulo 2.

Para a aplicação desta técnica, para cada tempo de decaimento, foram utilizados os seguintes dados de entrada no programa:

- 1 - número de opções = 12
- 2 - vida útil da instalação $n=30$ anos
- 3 - taxa de juros $\gamma = 12\%$ ao ano
- 4 - custo total da blindagem para cada opção, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7
- 5 - número de trabalhadores = 10
- 6 - dose individual anual de cada trabalhador para cada opção, conforme Tabelas 8, 9, 10, 11, 12 e 13.
- 7 - valor do termo $\alpha = 10.000,00$ U\$S (Sv-pessoa)⁻¹

Aos custos anualizados das blindagens encontrados pelo programa foram implementados os custos do sistema de monitoração da radiação. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 20, 21, 22, 23, 24 e 25 do Capítulo 5.

3.2.3 - Análise Custo Benefício Expandida

As duas técnicas anteriores só admitem dois atributos, a saber, Custo de Proteção Radiológica e Dose Coletiva ou Custo de Proteção Radiológica e Custo de Detrimento. Por outro lado, as nossas 12 opções de proteção foram baseadas nas distribuições das doses entre os trabalhadores e no gráfico do Capítulo 1 foi mostrado que a filosofia de proteção radiológica exige que se abaxem os níveis de radiação até se tornarem inferiores ao nível de registro. Neste caso a distribuição da dose se torna um fator importante uma vez que, o que se pretende, é alcançar o nível de registro. A análise custo-benefício expandida, permite efetuar uma análise quantitativa deste fator e, portanto, na sua aplicação foram considerados três **fatores**, a saber:

- Custo Anual de Proteção X
- Dose Coletiva S
- Distribuição da Dose Individual Máxima D

A introdução deste novo **fator** é feita de maneira indireta dando uma maior importância para menores doses com relação às maiores. Isto pode ser feito alterando o valor de α acrescentando valores β para as doses maiores. Para tanto, foram adotados os seguintes **critérios** :

Valor do termo α

O valor adotado para α é de 10.000,00 U\$\$(Sv-pessoa)⁻¹, pois é o adotado pela norma nacional CNEN-NE-3.01 ⁽¹¹⁾ e recomendado pela CIPR 60⁽¹³⁾, conforme item 2.5 do Capítulo 2.

Valores dos termos β

Neste trabalho, foram utilizados 4 intervalos de dose, sendo:

$$\text{I} \quad H \leq 0,0050 \text{ Sv}$$

$$\text{II} - 0,0050 \text{ Sv} < H \leq 0,0150 \text{ Sv}$$

$$\text{III} - 0,0150 \text{ Sv} < H \leq 0,0400 \text{ Sv}$$

$$\text{IV} - 0,0400 \text{ Sv} < H \leq 0,0500 \text{ Sv}$$

A divisão nestes quatro intervalos pode ser justificada da seguinte maneira:

- a) No primeiro intervalo encontram-se as doses inferiores ao nível de registro, isto é, doses que dispensam tanto a **monitoração de área com função controladora** como a **monitoração individual com função controladora**.
- b) No segundo intervalo encontram-se as doses que obrigam a **monitoração de área com função controladora** mas continua dispensando a **monitoração individual com função controladora**.

- c) No terceiro intervalo encontram-se as doses que não dispensam as monitorações com função controladora.
- d) No quarto intervalo encontram-se as doses que estão dentro de um erro de 20% no valor do limite anual para trabalhadores.

Fazendo analogia a um exemplo fornecido pela CIPR 55 (18) , neste trabalho foram adotados os seguintes valores:

$$\beta_I = 0$$

$$\beta_{II} = \alpha = 10.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

$$\beta_{III} = 2\alpha = 20.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

$$\beta_{IV} = 4\alpha = 40.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$$

Isto significa que, para valores menores ou iguais ao nível de registro, atribuímos $\beta=0$. Para valores onde temos condição de trabalho B, atribuímos mais US\$10.000,00 ao custo do detrimento. Para valores onde temos condição de trabalho A, mas as doses são menores do que 0,0400Sv atribuímos mais US\$20.000,00 ao custo do detrimento e para valores acima de 0,0400Sv atribuímos mais US\$40.000,00 ao detrimento, o que reforça a aversão a este intervalo de dose.

Para a aplicação desta técnica, para cada tempo de decaimento, foram utilizados os seguintes dados de entrada no programa:

- 1 - número de opções = 12
- 2 - vida útil da instalação $n=30$ anos
- 3 - taxa de juros $\gamma = 12\%$ ao ano
- 4 - custo total da blindagem para cada opção, conforme Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7.
- 5 - número de trabalhadores = 10
- 6 - dose individual anual de cada trabalhador para cada opção, conforme Tabelas 8, 9, 10, 11, 12 e 13
- 7 - valor do termo $\alpha = 10.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$

8 - para se avaliar a distribuição da dose individual, dividimos os trabalhadores em 3 grupos, sendo:

grupo 1 = formado por trabalhadores localizados a 30cm das celas de manipulação

grupo 2 = formado por trabalhadores localizados a 4 m das celas de manipulação

grupo 3 = formado por trabalhadores localizados a 6 m das celas de manipulação

9 - número de pessoas por grupo:

grupo 1 = 4 trabalhadores

grupo 2 = 3 trabalhadores

grupo 3 = 3 trabalhadores

10 - dose individual anual do trabalhador de cada grupo para cada opção, conforme

Tabelas 8, 9, 10, 11, 12 e 13.

11 - número de intervalos e seus valores

I $H \leq 0,0050 \text{ Sv}$

II - $0,0050 \text{ Sv} < H \leq 0,0150 \text{ Sv}$

III - $0,0150 \text{ Sv} < H \leq 0,0400 \text{ Sv}$

IV - $0,0400 \text{ Sv} < H \leq 0,0500 \text{ Sv}$

12 - valores dos termos β :

$\beta_I = 0$

$\beta_{II} = \alpha = 10.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$

$\beta_{III} = 2\alpha = 20.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$

$\beta_{IV} = 4\alpha = 40.000,00 \text{ US\$ (Sv-pessoa)}^{-1}$

Aos custos anualizados das blindagens encontrados pelo programa foram implementados os custos do sistema de monitoração da radiação. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 26, 27, 28, 29, 30 e 31 do capítulo 5.

3.2.4 - Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos

Na última técnica analisada foi possível, de maneira indireta, modificando o valor de α , introduzir um terceiro **atributo**, a Distribuição da Dose além dos dois anteriores, isto é, Custo de Proteção e Custo do Detrimento. A técnica que introduziremos agora é mais versátil, pois possibilita a introdução de tantos **atributos** quanto forem justificados, mesmo aqueles que parecem ser difíceis de serem quantificados. No problema em exame existe um **atributo** importante que não foi ainda levado em conta, ou seja, o tempo de decaimento. Quanto maior for o tempo de decaimento, menores serão as doses e menor será o custo de proteção, portanto, é um atributo completamente justificável em nossa análise. Nesta aplicação foram considerados quatro **fatores**, sendo:

- Custo Anual de Proteção X
- Dose Coletiva S
- Distribuição da Dose Individual Máxima D
- Tempo de decaimento T

Os critérios adotados foram:

Valores das Prioridades Parciais u_j

As equações a seguir foram especificadas de modo que para o menor custo (X), a menor dose coletiva (S), o maior tempo de decaimento (T) e a menor dose individual (D) foi-lhes atribuído pontuação máxima, ou seja, valor 1 e para o maior custo (X), a maior dose coletiva (S), o menor tempo de decaimento (T) e a maior dose individual (D) foi-lhes atribuído pontuação mínima, ou seja, valor 0.

Para os **fatores** X, S e T, foram escolhidas funções lineares que pela CIPR 55 ⁽¹⁸⁾ são denominadas de "atitude de risco neutro", sendo:

Para o fator X, temos : $u(x) = 1 \quad x = 22.678,44 \text{ US\$}$

$$u(x) = 0 \quad x = 42.929,88 \text{ US\$}$$

$$\text{logo: } u(x) = - 4,9379\text{E-}05 x + 2,1198$$

Para o fator S, temos: $u(s) = 1 \quad s = 0,0034 \text{ (Sv-pessoa)}$

$$u(s) = 0 \quad s = 0,2226 \text{ (Sv-pessoa)}$$

$$\text{logo: } u(s) = - 4,5620 s + 1,0155$$

Para o fator T, temos: $u(t) = 1 \quad t = 180 \text{ dias}$

$$u(t) = 0 \quad t = 30 \text{ dias}$$

$$\text{logo: } u(t) = 6,66\text{E-}03 t - 0,2$$

Para o fator D foi escolhida uma função não linear e utilizada a expressão genérica sugerida pela CIPR 55 ⁽¹⁸⁾ denominada de "atitude de risco adverso". Sendo esta função concava decrescente, demonstra uma aversão às doses mais altas. Desta maneira, temos:

$$u(d) = 1 \quad d \leq 0,0050 \text{ Sv}$$

$$u(d) = 0 \quad d \geq 0,0500 \text{ Sv}$$

Como para se definir esta função é necessário o conhecimento de no mínimo 3 pontos e sendo o nosso objetivo refutar doses mais altas, foi escolhido o terceiro ponto como sendo:

$$u(d) = 0,6 \quad d = 0,040 \text{ Sv}$$

$$\text{logo: } u(d) = 1,015 - 0,015 e^{93,657638 (d - 0,005)}$$

Valores das Constantes de Crescimento k_j

Será usado aqui o método de avaliação direta descrito na CIPR 55 (18), a saber:

$$\frac{k(X)}{R(X)} = \frac{k(S)}{\alpha R(S)} = \frac{k(D)}{\alpha R(D)} = \frac{k(T)}{R(T)}$$

onde

$$k(X) + k(S) + k(D) + k(T) = 1$$

$k(X)$, $k(S)$, $k(T)$ e $k(D)$ são as constantes de crescimento dos **atributos** em questão.

Se avaliarmos o intervalo de valores de X , T , S e D , teremos:

$$22.678,44 < X \leq 42.929,88 \text{ US\$}$$

$$0 < T \leq 6.261,56 \text{ US\$}$$

$$0 < D \leq 539,00 \text{ US\$}$$

$$34,00 < S \leq 2.226,02 \text{ US\$}$$

Para a determinação do intervalo de X foram tomados o maior custo de proteção encontrado, isto é, US\$42.929,88 que corresponde a 30 dias de decaimento opção 12 e o menor custo de proteção encontrado, isto é, US\$22.678,44 que corresponde 180 dias de decaimento opção 1.

O intervalo de T foi avaliado pelo acréscimo no custo de proteção provocado pela variação no tempo de decaimento para cada opção. Para tanto, foi tomado o menor valor de X para cada opção, no caso os valores da tabela dos 180 dias de decaimento, e verificadas as diferenças com os demais tempos de decaimento. A maior diferença, isto é, 6.261,56 US\$ foi atribuído o valor do intervalo, valor este encontrado para 30 dias de decaimento opção 1

Para a determinação do intervalo de D foram tomadas a maior dose individual encontrada, isto é, 53,9 mSv, que corresponde a 180 dias de decaimento opção 1 e a menor dose individual encontrada, isto é, zero, lembrando que doses inferiores a 1/100 do limite anual são consideradas nulas. Estes valores foram multiplicados pelo valor de α .

Para a determinação do intervalo de S foram tomados o maior custo do detrimento encontrado, isto é, US\$2.226,02, que corresponde a 180 dias de decaimento opção 1 e o menor custo do detrimento encontrado, isto é, US\$34,00, que corresponde 60 dias de decaimento opção 12.

Realizando o cálculo,teremos:

$$\frac{k(X)}{R(X)} = \frac{k(S)}{\alpha R(S)}$$

$$\frac{k(X)}{20251,44} = \frac{k(S)}{2192,02}$$

$$\frac{k(X)}{20251,44} = \frac{k(D)}{539,00}$$

$$\frac{k(X)}{20251,44} = \frac{k(T)}{6261,56}$$

$$k(S) = \frac{2192,02}{20251,44} k(X)$$

$$k(D) = \frac{539,00}{20251,44} k(X)$$

$$k(T) = \frac{6261,56}{20251,44} k(X)$$

$$k(X) + 0,108k(X) + 0,027k(X) + 0,309k(X) = 1$$

$$k(X) = 0,692$$

$$k(T) = 0,214$$

$$k(D) = 0,019$$

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

Para a aplicação desta técnica, foram utilizados os seguintes dados de entrada no programa:

- 1 - número de opções = 12
- 2 - número de **fatores** $j = 4$,
- 3 - valores das prioridades u_j de cada fator j para todas as opções conforme Tabelas 32, 33, 34, 35, 36 e 37.
- 4 - valores das constantes de crescimento k_j , conforme exposto acima.

Os resultados obtidos estão nas Tabelas 32 a 37 do Capítulo 5.

Vínculos no Tempo de Decaimento

De conformidade com a explicação dada no item 3.1.2 a respeito do resfriamento das miniplacas, foram adotados dois vínculos a este atributo estabelecendo o limite de variação do intervalo. O vínculo inferior é um resfriamento de 30 dias e o vínculo superior de 180 dias.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

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.

4.1 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento

No intuito de avaliarmos a robustez do resultado encontrado na aplicação da técnica de Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos, modificamos os valores das constantes de crescimento k_j de uma maneira que julgamos menos subjetiva que a anterior, ou seja, do método de avaliação direta, e mais lógica a qual denominamos método lógico (LOG), como mostraremos a seguir. O método da avaliação direta atribui a importância do **atributo** em função do intervalo de sua variação com relação à variação dos intervalos dos demais **atributos**. Neste caso, se um **atributo** tiver um intervalo de variação de 10^6 e os demais **atributos** um intervalo de variação de 10^3 , a importância relativa do primeiro com relação aos demais será de 99,9% para 0,1%, isto é, um fator mil e isto realmente não corresponderá a uma realidade lógica e racional.

Desta maneira, fizemos a seguinte análise: Tanto o custo de proteção radiológica como a distribuição de dose para os quais o primeiro corresponde a um custo realmente a ser gasto com a implementação da **opção** ótima e o segundo corresponde à diminuição de dose dos trabalhadores, realmente exigida pela filosofia de proteção radiológica, mantivemos o mesmo pé de igualdade na importância expressa pelos kj . Com relação ao detrimento biológico, representado pela dose coletiva, julgamos lógico dar-lhe uma importância que corresponda à relação entre seu custo e aquele da proteção radiológica. Isto se deve a dois motivos, a saber:

- 1 - As fontes pagadoras são diferentes; para o custo da proteção radiológica é o empregador e para o detrimento é o INSS, ainda que o montante seja pago pela sociedade.
- 2 - O período de incubação para o aparecimento do detrimento é de dezenas de anos e até lá as técnicas radio sanitárias terão evoluído e os custos, geralmente, serão inferiores aos atuais enquanto que o custo de proteção é imediatamente desembolsado.

Com relação ao tempo de resfriamento, julgamos que não é um **atributo** muito importante uma vez que ele representa uma variação no tempo de armazenagem do urânio imediato de um mês para seis meses, mas isto é sentido unicamente nos primeiros seis meses de vida da instalação, pois a seguir todo o mês será processado um lote de urânio irradiado.

Partindo destas hipóteses e verificando que o intervalo do custo que representa o detrimento biológico é no máximo de 1/10 do intervalo de custo que representa a proteção radiológica, os valores de kj respectivos deveriam manter aproximadamente a mesma relação.

Por fim, devido à pouca importância que demos ao tempo de decaimento, atribuímos-lhe o mesmo valor de kj daquele atribuído ao detrimento.

Neste caso as k_j , pelo método lógico (LOG), assumem os valores de:

$$k(X) = 0,45 \quad k(T) = 0,05 \quad k(D) = 0,45 \quad k(S) = 0,05$$

Por causa da pouca importância atribuída aos **fatores** tempo de decaimento e detrimento, conforme discutido acima, foram realizados cálculos, com a finalidade de verificar se existe variação na solução analítica encontrada com a análise de sensibilidade, considerando o valor da constante de crescimento como sendo zero para $k(S)$ e $k(T)$ e igual valor para $k(X)$ e $k(D)$, depois $k(X) < k(D)$ e $k(X) > k(D)$, como segue:

$$k(X) = 0,5 \quad k(T) = 0 \quad k(D) = 0,5 \quad k(S) = 0$$

$$k(X) = 0,6 \quad k(T) = 0 \quad k(D) = 0,4 \quad k(S) = 0$$

$$k(X) = 0,4 \quad k(T) = 0 \quad k(D) = 0,6 \quad k(S) = 0$$

Para estes estudos, foram utilizados os seguintes dados de entrada no programa:

- 1 - número de opções = 12
- 2 - número de **fatores** $j = 4$,
- 3 - valores das prioridades u_j de cada **fator** j para todas as opções conforme Tabelas 32, 33, 34, 35, 36 e 37.
- 4 - valores das constantes de crescimento k_j , conforme exposto acima.

O resultado obtido está na tabela 38 do capítulo 5.

Com o propósito de continuarmos avaliando a robustez do resultado apresentado pelo método de avaliação direta e pelo método lógico fazendo uso da

técnica de Prioridade com Atributos Múltiplos, variamos as constantes de crescimento k_j de maneira a dar importância máxima a cada **atributo** isoladamente, considerando os quatro k_j diferentes de zero, como segue:

1 - Importância máxima ao **fator** custo de proteção radiológica X

$$k(X) = 0,7 \quad k(T) = 0,1 \quad k(D) = 0,1 \quad k(S) = 0,1$$

2 - Importância máxima ao **fator** tempo de decaimento T

$$k(X) = 0,1 \quad k(T) = 0,7 \quad k(D) = 0,1 \quad k(S) = 0,1$$

3 - Importância máxima ao **fator** distribuição da dose individual máxima D

$$k(X) = 0,1 \quad k(T) = 0,1 \quad k(D) = 0,7 \quad k(S) = 0,1$$

4 - Importância máxima ao **fator** dose coletiva S

$$k(X) = 0,1 \quad k(T) = 0,1 \quad k(D) = 0,1 \quad k(S) = 0,7$$

Em virtude da robustez na solução analítica procurou-se por em evidência a contribuição de cada **atributo** fornecendo para ele um valor máximo e mínimo para os demais. Como já tinha sido considerado um valor mínimo de zero e 0,05 para os **atributos** dose coletiva e tempo de decaimento resolvemos considerar como valor mínimo 0,1 e conseqüentemente como valor máximo 0,7. Os resultados encontram-se nas Tabelas 39 a 42.

Para estes estudos, foram utilizados os seguintes dados de entrada no programa:

1 - número de opções = 12

2 - número de **fatores** $j = 4$,

3 - valores das prioridades u_j de cada **fator** j para todas as opções conforme Tabelas 32, 33, 34, 35, 36 e 37.

4 - valores das constantes de crescimento k_j , conforme exposto acima.

Os resultados obtidos estão nas Tabelas 39 a 42 do Capítulo 5.

Tendo agora 5 resultados diferentes encontrados a partir da análise de sensibilidade das constantes de crescimento, iremos analisar a importância relativa dos **fatores**. Para tal análise foi feito um gráfico da dose individual pela pontuação obtida para cada **opção** quando aplicadas as constantes de crescimento e obtidos os cinco resultados anteriores. Tal gráfico encontra-se no item 5.9 do capítulo 5.

Por fim é também interessante fazer um estudo de sensibilidade dos **critérios** utilizados neste trabalho tanto para os juros anuais como para o valor de α .

4.2 - Análise de Sensibilidade dos Juros Anuais

Variamos os juros anuais desde zero %, isto é, dividimos o custo total por 30 anos até 12% ao ano, base usada no nosso trabalho.

O valor zero justifica-se em termos de instituição governamental, uma vez que ele só gasta o que recebe e portanto o fato de dispor do montante necessário depende unicamente do **critério** prioridade ao qual é atribuído o projeto. O valor 12% justifica-se por ser o valor internacional máximo solicitado nos empréstimos. Os demais valores adotados justificam-se por serem intermediários, a saber: 3%, 6% e 9%.

Para realizarmos esta análise utilizamos a técnica de análise de prioridade com atributos múltiplos considerando as constantes de crescimento usadas no método lógico, ou seja, $k(X)=0,45$, $k(T)=0,05$, $k(D)=0,45$ e $k(S)=0,05$, mantendo $u(S)$, $u(D)$ e $u(T)$ e variando $u(X)$ para os juros anuais 0%, 3%, 6%, 9% e 12%.

Os resultados obtidos estão na Tabela 43 do capítulo 5.

4.3 - Análise de Sensibilidade do Critério α

Variamos o valor de α de US\$ 3.000,00 até US\$ 25.000,00, fazendo os cálculos para os seguintes valores: US\$3.000,00, US\$10.000,00, US\$20.000,00 e US\$25.000,00.

O valor US\$3.000,00 foi escolhido por tratar-se do valor mínimo internacional a ser adotado por todos os países que possam ter valores inferiores a este, de acordo com um convênio feito entre todos os países membros da AIEA e também por tratar-se do valor real, atual do nosso país, conforme dados da literatura (20).

O valor US\$10.000,00 foi escolhido por ser o valor aconselhado pela CIPR e AIEA para todos os países que não tenham efetuado o seu próprio cálculo e por ser o valor oficial adotado pela CNEN em nosso país.

O valor de US\$20.000,00 foi escolhido por tratar-se do valor adotado pela maioria dos países do primeiro mundo, como Europa e Estados Unidos.

O valor US\$25.000,00 foi escolhido por tratar-se do maior valor atual, adotado pelo Japão.

Para realizarmos esta análise utilizamos a técnica de custo-benefício para o tempo de decaimento de 180 dias. Neste caso, não é possível utilizar a técnica de análise de prioridade com atributos múltiplos, pois tal técnica não considera o valor de alfa.

O resultado obtido está na Tabela 45 do Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 - Inventário físsil das miniplacas de UO₂

Conforme explicado no item 2.6.1, na Tabela 1 estão expostos os resultados do inventário físsil das miniplacas com queima de 50% do nuclídeo U-235 sob fluxo constante no reator de pesquisa IEA-R1 para os diferentes tempos de resfriamento fazendo uso do programa ORIGEN 2.

Tabela 1 - Inventário Físsil da miniplaca [Bq/miniplaca]

NUCLÍDEO	TEMPO DE DECAIMENTO (DIAS)					
	30	60	90	120	150	180
ACTINÍDEOS						
U - 237	1,327+10	6,097+8	2,802+7	1,302+6	7,466+4	1,824+4
Pu - 238	1,077+9	1,084+9	1,090+9	1,095+9	1,100+9	1,104+9
Pu - 239	3,647+8	3,647+8	3,647+8	3,647+8	3,647+8	3,647+8
Pu - 240	3,999+8	3,999+8	3,999+8	3,999+8	3,999+8	3,999+8
Pu - 241	6,460+10	6,434+10	6,408+10	6,382+10	6,356+10	6,334+10
Am - 241	1,566+8	1,651+8	1,736+8	1,820+8	1,903+8	1,986+8
Cm - 244	9,342+7	9,312+7	9,283+7	9,253+7	9,224+7	9,194+7
TOTAL	9,316+10	7,799+10	6,626+10	6,597+10	6,571+10	6,549+10
PRODUTOS DE ATIVAÇÃO						
Cr - 51	2,796+11	1,320+11	6,234+10	2,943+10	1,389+10	6,563+9
Zr - 95	1,297+10	9,372+9	6,771+9	4,891+9	3,534+9	2,554+9
Nb - 95	1,667+10	1,409+10	1,128+10	8,806+9	6,711+9	5,039+9
Nb - 95m	9,620+7	6,952+7	5,024+7	3,629+7	2,622+7	1,894+7
TOTAL	3,094+11	1,556+11	4,317+10	4,317+10	2,418+10	1,418+10

Tabela 1 - Continuação

NUCLÍDEO	TEMPO DE DECAIMENTO (DIAS)					
	30	60	90	120	150	180
PRODUTOS DE FISSÃO						
Kr - 85	1,156+10	1,149+10	1,144+10	1,137+10	1,131+10	1,125+10
Sr - 89	3,544+11	2,348+11	1,555+11	1,030+11	6,826+10	4,521+10
Sr - 90	9,916+10	9,897+10	9,875+10	9,856+10	9,838+10	9,819+10
Y - 90	9,923+10	9,901+10	9,882+10	9,864+10	9,845+10	9,827+10
Y - 91	4,728+11	3,312+11	2,322+11	1,627+11	1,140+11	7,995+10
Zr - 95	5,890+11	4,255+11	3,075+11	2,221+11	1,605+11	1,159+11
Nb - 95	7,614+11	6,426+11	5,154+11	4,007+11	3,051+11	2,291+11
Nb - 95m	4,369+9	3,157+9	2,281+9	1,648+9	1,191+9	8,602+8
Ru - 103	3,350+11	1,973+11	1,162+11	6,845+10	4,033+10	2,375+10
Rh- 103m	3,020+11	1,778+11	1,047+11	6,171+10	3,634+10	2,140+10
Ru -106	1,775+11	1,677+11	1,585+11	1,498+11	1,416+11	1,338+11
Rh - 106	1,775+11	1,677+11	1,585+11	1,498+11	1,416+11	1,338+11
Sb - 125	8,424+9	8,258+9	8,091+9	7,925+9	7,762+9	7,607+9
Te - 127	4,425+9	3,525+9	2,913+9	2,406+9	1,989+9	1,643+9
Te- 127m	4,354+9	3,598+9	2,973+9	2,457+9	2,030+9	1,677+9
Te - 129	6,356+9	3,422+9	1,843+9	9,927+9	5,346+9	2,878+9
Te- 129m	9,764+9	5,257+9	2,831+9	1,525+9	8,214+9	4,421+9
I - 131	3,256+10	2,451+9	1,846+8	1,390+7	1,047+6	7,884+4
Xe - 133	2,119+10	4,021+8	7,636+6	1,449+5	2,751+3	5,220+1
Cs - 134	7,440+10	7,237+10	7,041+10	6,848+10	6,663+10	6,482+10
Cs - 136	4,321+9	8,839+8	1,807+8	3,696+7	7,559+6	1,545+6
Cs - 137	1,159+11	1,156+11	1,154+11	1,152+11	1,150+11	1,148+11
Ba- 137m	1,096+11	1,094+11	1,092+11	1,090+11	1,088+11	1,086+11
Ba - 140	1,583+11	3,114+10	6,127+9	1,205+9	2,371+8	4,669+7
La - 140	1,821+11	3,584+10	7,052+9	1,387+9	2,729+8	5,368+7
Ce - 141	4,095+11	2,160+11	1,139+11	6,012+10	3,171+10	1,673+10
Pr - 143	1,772+11	3,825+10	8,262+9	1,783+9	3,851+8	8,313+7
Ce - 144	6,671+11	6,201+11	5,764+11	5,357+11	4,980+11	4,628+11
Pr - 144	6,671+11	6,201+11	5,764+11	5,357+11	4,980+11	4,632+11
Nd - 147	4,599+10	7,018+10	1,070+9	1,633+8	2,492+7	3,803+6
Pm - 147	1,719+11	1,687+11	1,651+11	1,616+11	1,581+11	1,547+11
Pm-148m	1,373+10	8,302+9	5,017+9	3,032+9	1,832+9	1,107+9
Eu - 154	5,557+9	5,520+9	5,483+9	5,446+9	5,413+9	5,376+9
Eu - 156	7,033+9	1,788+9	4,547+8	1,155+8	2,939+7	7,474+6
TOTAL	6,308+12	4,654+12	3,755+12	3,157+12	2,728+12	2,408+12

5.2 - Doses individuais a várias distâncias e custos de proteção radiológica

Com os resultados do inventário fissil das miniplacas de UO₂ foram determinadas as espessuras de paredes e tetos das duas celas fazendo uso do código ISOSHLTD discutido no item 2.6.2 e da relação de dose parede para teto especificada no item 3.1.2.

Nas Tabelas 2 a 7, além das espessuras das paredes e do teto, estão especificadas as doses equivalentes anuais nas distâncias médias de permanência dos trabalhadores como discutido no item 3.1.2 e o custo total das duas celas considerando o preço do chumbo mencionado no item 3.1.2 para cada opção de proteção, que é função da dose máxima do trabalhador nos doze grupos de dose equivalente discutidos no item 3.1.2.

As Tabelas 2 a 7 foram montadas uma para cada tempo de decaimento escolhido entre 30 e 180 dias.

Tabela 2 - Custo total e dose total para 30 dias de decaimento

OPÇÃO	DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30cm		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m		ESPESSURAS (cm)		CUSTO TOTAL (U\$S)
	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	
1	0,0480	4,80E-3	1,38E-3	2,90E-4	6,54E-4	1,47E-4	16,20	3,60	229901,37
2	0,0390	3,90E-3	1,13E-3	2,30E-4	5,37E-4	1,20E-4	16,60	3,80	235853,52
3	0,0286	2,86E-3	8,45E-4	1,84E-4	4,19E-4	9,34E-5	17,20	4,08	244732,12
4	0,0199	1,99E-3	5,97E-4	1,23E-4	2,82E-4	6,26E-5	17,90	4,53	255396,37
5	0,0146	1,46E-3	4,44E-4	9,13E-5	2,10E-4	4,62E-5	18,50	4,87	264423,78
6	0,0119	1,19E-3	3,64E-4	7,50E-5	1,72E-4	3,80E-5	18,90	5,09	270425,91
7	9,68E-3	9,68E-4	2,99E-4	6,12E-5	1,41E-4	3,10E-5	19,30	5,31	276427,26
8	7,88E-3	7,88E-4	2,45E-4	5,00E-5	1,16E-4	2,53E-5	19,70	5,54	282453,80
9	5,79E-3	5,79E-4	1,82E-4	3,70E-5	8,65E-5	1,87E-5	20,30	5,87	291456,42
10	3,83E-3	3,83E-4	1,22E-4	2,46E-5	5,84E-5	1,25E-5	21,10	6,33	303509,49
11	9,61E-4	9,61E-5	3,25E-5	6,40E-6	1,55E-5	3,26E-6	23,80	7,84	344083,24
12	7,83E-4	7,83E-5	2,67E-5	5,23E-6	1,27E-5	2,66E-6	24,40	8,06	350084,98

Tabela 3 - Custo total e dose total para 60 dias de decaimento

OPÇÃO	DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30cm		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m		ESPESSURAS (cm)		CUSTO TOTAL (US\$)
	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	
1	0,0487	4,807E-3	1,34E-3	2,88E-4	6,34E-4	1,45E-4	14,20	3,58	202571,10
2	0,0397	3,97E-3	1,10E-3	2,36E-4	5,21E-4	1,19E-4	14,60	3,80	208572,85
3	0,0292	2,92E-3	8,26E-4	1,75E-4	3,89E-4	8,84E-5	15,20	4,14	217600,25
4	0,0194	1,94E-3	5,59E-4	1,17E-4	2,63E-4	5,93E-5	16,00	4,59	229628,53
5	0,0150	1,50E-3	4,38E-4	9,15E-5	2,07E-4	4,62E-5	16,50	4,87	237143,10
6	0,0117	1,17E-3	3,44E-4	7,18E-5	1,62E-4	3,63E-5	17,00	5,14	244632,87
7	0,0100	1,00E-3	2,97E-4	6,15E-5	1,40E-4	3,11E-5	17,30	5,31	249146,58
8	7,80E-3	7,80E-4	2,33E-4	4,82E-5	1,10E-4	2,44E-5	17,80	5,58	256636,35
9	5,76E-3	5,76E-4	1,74E-4	3,58E-5	8,26E-5	1,81E-5	18,40	5,91	265638,96
10	3,85E-3	3,83E-4	1,18E-4	2,42E-5	5,62E-5	1,22E-5	19,20	6,35	277642,43
11	9,92E-4	9,92E-5	3,23E-5	6,45E-6	1,53E-5	3,28E-6	21,90	7,84	318166,58
12	7,73E-4	7,73E-5	2,54E-5	5,05E-6	1,20E-5	2,57E-6	22,40	8,11	325656,35

Tabela 4 - Custo total e dose total para 90 dias de decaimento

OPÇÃO	DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30cm		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m		ESPESSURAS (cm)		CUSTO TOTAL (US\$)
	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	
1	0,0488	4,88E-3	1,34E-3	2,90E-4	6,33E-4	1,46E-4	13,20	3,58	188930,78
2	0,0385	3,85E-3	1,05E-3	2,20E-4	4,96E-4	1,13E-4	13,70	3,86	196445,36
3	0,0299	2,99E-3	8,26E-4	1,74E-4	3,89E-4	8,90E-5	14,20	4,13	203935,13
4	0,0199	1,99E-3	5,61E-4	1,19E-4	2,64E-4	6,00E-5	15,00	4,58	215963,41
5	0,0147	1,47E-3	4,20E-4	8,80E-5	1,98E-4	4,40E-5	15,60	4,91	224966,02
6	0,0120	1,20E-3	3,47E-4	7,20E-5	1,63E-4	3,60E-5	16,00	5,13	231511,63
7	9,87E-3	9,87E-4	2,86E-4	6,00E-5	1,35E-4	3,03E-5	16,40	5,34	236944,69
8	7,69E-3	7,69E-4	2,25E-4	4,70E-5	1,06E-4	2,83E-5	16,90	5,62	244459,27
9	6,00E-3	6,00E-4	1,78E-4	3,60E-5	8,41E-5	1,86E-5	17,40	5,89	251949,04
10	3,83E-3	3,83E-4	1,16E-4	2,30E-5	5,49E-5	1,20E-5	18,30	6,38	265440,55
11	9,63E-4	9,63E-5	3,08E-5	6,20E-6	1,46E-5	3,15E-6	21,10	7,88	307353,52
12	7,91E-4	7,91E-5	2,55E-5	5,11E-6	1,21E-5	2,60E-6	21,50	8,10	313355,26

Tabela 5 - Custo total e dose total para 120 dias de decaimento

OPÇÃO	DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30cm		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m		ESPESSURAS (cm)		CUSTO TOTAL (US\$)
	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	
1	0,0478	4,78E-3	1,28E-3	2,78E-4	6,00E-4	1,40E-4	12,90	3,63	184962,70
2	0,0389	3,89E-3	1,05E-3	2,26E-4	4,96E-4	1,13E-4	13,30	3,85	190964,43
3	0,0287	2,87E-3	7,88E-4	1,69E-4	3,71E-4	8,51E-5	13,90	4,19	199991,84
4	0,0191	1,91E-3	5,36E-4	1,14E-4	2,52E-4	5,74E-5	14,70	4,63	211995,32
5	0,0149	1,49E-3	4,22E-4	8,95E-5	1,99E-4	4,51E-5	15,20	4,90	219485,09
6	0,0116	1,16E-3	3,32E-4	7,00E-5	1,57E-4	3,53E-5	15,70	5,17	226974,86
7	0,0100	1,00E-3	2,88E-4	6,06E-5	1,36E-4	3,06E-5	16,00	5,34	231488,56
8	7,82E-3	7,82E-4	2,27E-4	4,76E-5	1,07E-4	2,40E-5	16,50	5,60	238953,54
9	5,81E-3	5,81E-4	1,71E-4	3,57E-5	8,09E-5	1,80E-5	17,10	5,93	247956,14
10	3,91E-3	3,91E-4	1,17E-4	2,42E-5	5,55E-5	1,22E-5	17,90	6,36	259934,82
11	9,90E-4	9,90E-5	3,15E-5	6,36E-6	1,49E-5	3,22E-6	20,70	7,86	301847,79
12	7,76E-4	7,76E-5	2,49E-5	5,01E-6	1,18E-5	2,54E-6	21,20	8,13	309337,56

Tabela 6 - Custo total e dose total para 150 dias de decaimento

OPÇÃO	DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30cm		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m		ESPESSURAS (cm)		CUSTO TOTAL (US\$)
	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	
1	0,0486	4,86E-3	1,29E-3	2,80E-4	6,09E-4	1,41E-4	12,60	3,62	180845,80
2	0,0396	3,96E-3	1,06E-3	2,30E-4	5,01E-4	1,15E-4	13,00	3,84	186847,54
3	0,0292	2,92E-3	7,98E-4	1,71E-4	3,75E-4	8,65E-5	13,60	4,17	195850,14
4	0,0195	1,95E-3	5,43E-4	1,15E-4	2,55E-4	5,83E-5	14,40	4,61	207853,62
5	0,0144	1,44E-3	4,08E-4	8,63E-5	1,92E-4	4,35E-5	15,00	4,94	216856,23
6	0,0118	1,18E-3	3,37E-4	7,10E-5	1,59E-4	3,58E-5	15,40	5,16	222857,96
7	9,73E-3	9,73E-4	2,79E-4	5,88E-5	1,31E-4	2,97E-5	15,80	5,37	228834,90
8	7,98E-3	7,98E-4	2,30E-4	4,85E-5	1,09E-4	2,45E-5	16,20	5,59	234836,65
9	5,93E-3	5,93E-4	1,73E-4	3,63E-5	8,21E-5	1,83E-5	16,80	5,91	243814,45
10	4,00E-3	4,00E-4	1,19E-4	2,46E-5	5,64E-5	1,24E-5	17,60	6,34	255793,12
11	9,66E-4	9,66E-5	3,06E-5	6,18E-6	1,45E-5	3,14E-6	20,50	7,89	299194,13
12	7,95E-4	7,95E-5	2,53E-5	5,12E-6	1,20E-5	2,60E-6	20,90	8,10	305171,07

Tabela 7 - Custo total e dose total para 180 dias de decaimento

OPÇÃO	DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30cm		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m		DOSE ANUAL EM (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m		ESPESSURAS (cm)		CUSTO TOTAL (US\$)
	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	PAREDE	TETO	
1	0,0490	4,90E-3	1,30E-3	2,84E-4	6,11E-4	1,43E-4	12,50	3,61	179456,97
2	0,0399	3,99E-3	1,07E-3	2,32E-4	5,03E-4	1,16E-4	12,90	3,83	185458,71
3	0,0294	2,94E-3	8,02E-4	1,72E-4	3,77E-4	8,67E-5	13,50	4,17	194486,11
4	0,0197	1,97E-3	5,46E-4	1,16E-4	2,57E-4	5,89E-5	14,30	4,60	206464,79
5	0,0146	1,46E-3	4,10E-4	8,72E-5	1,93E-4	4,39E-5	14,90	4,93	215467,39
6	0,0119	1,19E-3	3,39E-4	7,15E-5	1,60E-4	3,61E-5	15,30	5,15	221469,13
7	9,81E-3	9,81E-4	2,80E-4	5,92E-5	1,32E-4	2,99E-5	15,70	5,36	227446,07
8	7,66E-3	7,66E-4	2,21E-4	4,65E-5	1,04E-4	2,35E-5	16,20	5,63	234935,85
9	5,98E-3	5,98E-4	1,75E-4	3,63E-5	8,26E-5	1,83E-5	16,70	5,90	242425,62
10	3,84E-3	3,84E-4	1,14E-4	2,37E-5	5,41E-5	1,19E-5	17,60	6,39	255917,13
11	9,74E-4	9,74E-5	3,08E-5	6,17E-6	1,46E-5	3,13E-6	20,40	7,89	297830,10
12	7,63E-4	7,63E-5	2,43E-5	5,12E-6	1,15E-5	2,60E-6	20,90	8,10	305171,07

5.3 - Doses equivalentes efetivas anuais para as diferentes grupos de trabalhadores

Nas Tabelas 8 a 13 estão especificadas as doses equivalentes anuais totais, causadas pela blindagem das paredes e do teto, nas distâncias médias de permanência dos trabalhadores, como discutido no item 3.1.2 para cada opção de proteção.

As Tabelas 8 a 13 foram montadas uma para cada tempo de decaimento escolhido entre 30 e 180 dias. Lembramos que doses inferiores a 1/100 do limite anual são consideradas com valor zero, portanto o limiar zero tem o valor de $5,0 \times 10^{-4}$ Sv/ano.

Tabela 8 - Dose total individual para 30 dias de decaimento

OPÇÃO	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30 cm	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m
1	0,0528	1,67E-3	8,01E-4
2	0,0429	1,36E-3	6,57E-4
3	0,0314	1,02E-3	5,13E-4
4	0,0218	7,02E-4	-
5	0,0160	5,35E-4	-
6	0,0131	-	-
7	0,0106	-	-
8	8,66E-3	-	-
9	6,36E-3	-	-
10	4,21E-3	-	-
11	1,05E-3	-	-
12	8,61E-4	-	-

Tabela 9 - Dose total individual para 60 dias de decaimento

OPÇÃO	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30 cm	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m
1	0,0535	1,62E-3	7,79E-4
2	0,0436	1,33E-3	6,40E-4
3	0,0321	1,00E-3	-
4	0,0213	6,76E-4	-
5	0,0165	5,29E-4	-
6	0,0128	-	-
7	0,0110	-	-
8	8,58E-3	-	-
9	6,33E-3	-	-
10	4,23E-3	-	-
11	1,01E-3	-	-
12	8,50E-4	-	-

Tabela 10 - Dose total individual para 90 dias de decaimento

OPÇÃO	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30 cm	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m
1	0,0536	1,63E-3	7,79E-4
2	0,0423	1,27E-3	6,09E-4
3	0,0328	1,00E-3	-
4	0,0218	6,80E-4	-
5	0,0161	5,08E-4	-
6	0,0132	-	-
7	0,0108	-	-
8	8,45E-3	-	-
9	6,60E-3	-	-
10	4,20E-3	-	-
11	1,05E-3	-	-
12	8,70E-4	-	-

Tabela 11 - Dose total individual para 120 dias de decaimento

OPÇÃO	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30 cm	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m
1	0,0525	1,55E-3	7,42E-4
2	0,0427	1,27E-3	6,09E-4
3	0,0315	9,57E-4	-
4	0,0210	6,50E-4	-
5	0,0163	5,11E-4	-
6	0,0127	-	-
7	0,0110	-	-
8	8,60E-3	-	-
9	6,39E-3	-	-
10	4,30E-3	-	-
11	1,08E-3	-	-
12	8,53E-4	-	-

Tabela 12 - Dose total individual para 150 dias de decaimento

OPÇÃO	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30 cm	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m
1	0,0534	1,57E-3	7,50E-4
2	0,0435	1,29E-3	6,16E-4
3	0,0321	9,69E-4	-
4	0,0214	6,58E-4	-
5	0,0158	-	-
6	0,0129	-	-
7	0,0107	-	-
8	8,77E-3	-	-
9	6,52E-3	-	-
10	4,40E-3	-	-
11	1,06E-3	-	-
12	8,74E-4	-	-

Tabela 13 - Dose total individual para 180 dias de decaimento

OPÇÃO	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 30 cm	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 4m	TOTAL DA DOSE ANUAL (Sv) PARA DISTÂNCIA DE 6m
1	0,0539	1,58E-3	7,54E-4
2	0,0438	1,30E-3	6,19E-4
3	0,0323	9,74E-4	-
4	0,0216	6,62E-4	-
5	0,0160	-	-
6	0,0130	-	-
7	0,0107	-	-
8	8,42E-3	-	-
9	6,57E-3	-	-
10	4,22E-3	-	-
11	1,06E-3	-	-
12	8,74E-4	-	-

OBS: (-) doses desprezíveis consideradas como zero, conforme mostrado no capítulo 3.

5.4 - Resultados apresentados na aplicação da técnica de análise diferencial custo-benefício

De conformidade com o item 3.2.1, nas Tabelas 14 a 19 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da técnica de Análise Diferencial Custo-Benefício.

As Tabelas 14 a 19 foram montadas uma para cada tempo de decaimento escolhido entre 30 e 180 dias.

Tabela 14 - Análise diferencial custo-benefício para 30 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	ΔX US\$	DOSE COLETIVA ANUAL S Sv-PESSOA	ΔS Sv-PESSOA	$\frac{\Delta X}{\Delta S}$ $\text{US\$}(Sv\text{-PESSOA})^{-1}$
1	28940,80		0,2186		
2	29679,72	738,92	0,1777	0,409620E-1	0,180392E+5
3	30781,94	1102,22	0,1302	0,474520E-1	0,232282E+5
4	32105,84	1323,90	0,0894	0,408390E-1	0,324175E+5
5	33226,54	1120,70	0,0656	0,237550E-1	0,471773E+5
6	33571,66	345,12	0,0524	0,132050E-1	0,261355E+5
7	34316,69	745,03	0,0424	0,100000E-1	0,745027E+5
8	35064,85	748,16	0,0346	0,776000E-2	0,964124E+5
9	36182,46	1117,61	0,0254	0,920000E-2	0,121480E+6
10	37147,83	965,37	0,0168	0,860000E-2	0,112252E+6
11	42184,80	5036,97	0,0042	0,126400E-1	0,39849E+6
12	42929,88	745,08	0,0034	0,756000E-3	0,985553E+6

Tabela 15 - Análise diferencial custo-benefício para 60 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	ΔX US\$	DOSE COLETIVA ANUAL S Sv-PESSOA	ΔS Sv-PESSOA	$\frac{\Delta X}{\Delta S}$ $\text{US\$}(Sv\text{-PESSOA})^{-1}$
1	25547,92		0,2212		
2	26292,00	745,08	0,1803	0,408870E-1	0,182229E+5
3	27413,69	1120,70	0,1314	0,489100E-1	0,229134E+5
4	28906,92	1493,23	0,0872	0,441720E-1	0,338050E+5
5	29839,81	932,89	0,0676	0,196410E-1	0,474969E+5
6	30369,62	529,81	0,0512	0,163870E-1	0,323310E+5
7	30929,97	560,35	0,0440	0,720000E-2	0,778261E+5
8	31859,77	929,81	0,0343	0,968000E-2	0,960544E+5
9	32977,39	1117,62	0,0253	0,900000E-2	0,124180E+6
10	33936,60	959,21	0,0169	0,840000E-2	0,114191E+6
11	38967,41	5030,82	0,0040	0,128800E-1	0,390591E+6
12	39897,22	929,80	0,0034	0,640000E-3	0,145282E+7

Tabela 16 - Análise diferencial custo-benefício para 90 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	ΔX US\$	DOSE COLETIVA ANUAL S Sv-PESSOA	ΔS Sv-PESSOA	$\frac{\Delta X}{\Delta S}$ $\text{US\$}(\text{Sv-PESSOA})^{-1}$
1	23854,56		0,2216		
2	24787,45	932,89	0,1748	0,468270E-1	0,199220E+5
3	25717,25	929,81	0,1342	0,406370E-1	0,228808E+5
4	27210,49	1493,23	0,0892	0,449600E-1	0,332125E+5
5	28328,10	1117,62	0,0659	0,233160E-1	0,479335E+5
6	28740,70	412,60	0,0528	0,131240E-1	0,314380E+5
7	29415,18	674,48	0,0432	0,960000E-2	0,702584E+5
8	30348,07	932,89	0,0338	0,940000E-2	0,992432E+5
9	31277,88	929,81	0,0264	0,740000E-2	0,125650E+6
10	32421,81	1143,93	0,0168	0,960000E-2	0,119159E+6
11	37625,04	5203,23	0,0042	0,126000E-1	0,412955E+6
12	38370,12	745,08	0,0035	0,720000E-3	0,103483E+7

Tabela 17 - Análise diferencial custo-benefício para 120 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	ΔX US\$	DOSE COLETIVA ANUAL S Sv-PESSOA	ΔS Sv-PESSOA	$\Delta X/\Delta S$ US\$(Sv-PESSOA) ⁻¹
1	23361,95		0,2169		
2	24107,02	745,08	0,1764	0,404390-1	0,184247E+5
3	25227,72	1120,70	0,1289	0,475660E-1	0,235609E+5
4	26717,87	1490,15	0,0860	0,429210E-1	0,347186E+5
5	27647,68	929,81	0,0667	0,192170E-1	0,483847E+5
6	28177,49	529,81	0,0508	0,159330E-1	0,332520E+5
7	28737,84	560,35	0,0440	0,680000E-2	0,824041E+5
8	29664,57	926,73	0,0344	0,960000E-2	0,965344E+5
9	30782,18	1117,62	0,0256	0,884000E-2	0,126427E+6
10	31738,31	956,13	0,0172	0,836000E-2	0,114369E+6
11	36941,53	5203,23	0,0043	0,128800E-1	0,403977+6
12	37871,34	929,81	0,0034	0,908000E-3	0,102402E+7

Tabela 18 - Análise diferencial custo-benefício para 150 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	ΔX US\$	DOSE COLETIVA ANUAL S Sv-PESSOA	ΔS Sv-PESSOA	$\Delta X/\Delta S$ $\text{US\$}(\text{Sv-PESSOA})^{-1}$
1	22850,86		0,2206		
2	23595,94	745,08	0,1797	0,408420-1	0,182430E+5
3	24713,55	1117,62	0,1313	0,484110E-1	0,230860E+5
4	26203,71	1490,16	0,0876	0,437330E-1	0,340740E+5
5	27321,32	1117,62	0,0632	0,243740E-1	0,458528E+5
6	27666,40	345,08	0,0516	0,116000E-1	0,297480E+5
7	28408,40	742,00	0,0428	0,880000E-2	0,843182E+5
8	29153,48	745,08	0,0351	0,772000E-2	0,965130E+5
9	30268,02	1114,54	0,0261	0,900000E-2	0,123837E+6
10	31224,14	956,12	0,0176	0,848000E-2	0,114368E+6
11	36612,10	5387,96	0,0042	0,133600E-1	0,403290+6
12	37354,10	742,00	0,0035	0,744000E-3	0,997312E+6

Tabela 19 - Análise diferencial custo-benefício para 180 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	ΔX US\$	DOSE COLETIVA ANUAL S Sv-PESSOA	ΔS Sv-PESSOA	ΔX/ΔS US\$(Sv-PESSOA) ⁻¹
1	22678,44		0,2226		
2	23423,52	745,08	0,1810	0,416450-1	0,178912E+5
3	24544,22	1120,70	0,1321	0,488350E-1	0,229486E+5
4	26031,29	1487,08	0,0884	0,437360E-1	0,340012E+5
5	27148,91	1117,61	0,0640	0,243860E-1	0,458301E+5
6	27493,99	345,08	0,0520	0,120000E-1	0,287560E+5
7	28235,98	742,00	0,0428	0,920000E-2	0,806520E+5
8	29165,79	929,81	0,0337	0,912000E-2	0,101953E+6
9	30095,60	929,81	0,0263	0,740000E-2	0,125650E+6
10	31239,54	1143,94	0,0169	0,940000E-2	0,134898E+6
11	36442,76	5203,23	0,0042	0,126400E-1	0,411648+6
12	37354,10	911,34	0,0035	0,744000E-3	0,122491E+7

Como por esta técnica de análise a opção ótima é aquela que satisfaz a relação:

$$\frac{\Delta X}{\Delta S} \leq \alpha = 0,1 \times 10^{+5}$$

vemos que a solução ótima é para todos os tempos de decaimento a opção 1 por estar mais próxima do valor de α ainda que seja superior a este. Mas como a opção 1 não obedece aos limites anuais para o trabalhador, a opção 2 deve ser considerada como a ótima e o resultado desta opção está ressaltado em negrito nas tabelas.

5.5 - Resultados apresentados na aplicação da técnica de análise custo-benefício

De conformidade com o item 3.2.2, nas Tabelas 20 a 25 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da técnica de Análise Custo-Benefício.

As Tabelas 20 a 25 foram montadas uma para cada tempo de decaimento escolhido entre 30 e 180 dias.

Tabela 20 - Análise custo-benefício para 30 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	28940,00	2186,13	31126,93
2	29679,72	1776,51	31456,23
3	30781,94	1301,99	32083,93
4	32105,84	893,60	32999,44
5	33226,54	656,00	33882,54
6	33571,66	524,00	34095,66
7	34316,69	424,00	34740,69
8	35064,85	346,40	35411,25
9	36182,46	254,40	36436,86
10	37147,83	168,40	37316,23
11	42184,80	42,00	42226,80
12	42929,88	34,44	42964,32

Tabela 21 - Análise custo-benefício para 60 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	25547,92	2211,97	27759,89
2	26292,99	1803,10	28096,09
3	27413,69	1314,00	28627,69
4	28906,92	872,28	29779,20
5	29839,81	675,87	30551,68
6	30369,62	512,00	30881,62
7	30929,97	440,00	31369,97
8	31859,77	343,20	32202,97
9	32977,39	253,20	33230,59
10	33936,60	169,20	34105,80
11	38967,41	40,40	39007,81
12	39897,22	34,00	39931,22

Tabela 22 - Análise custo-benefício para 90 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	23854,56	2216,27	26070,83
2	24787,45	1748,37	26535,81
3	25717,25	1342,00	27059,25
4	27210,49	892,40	28102,89
5	28328,10	659,24	28987,34
6	28740,70	528,00	29268,70
7	29415,18	432,00	29847,18
8	30348,07	338,00	30686,07
9	31277,88	264,00	31541,88
10	32421,81	168,00	32589,81
11	37625,04	42,00	37667,04
12	38370,12	34,80	38404,92

Tabela 23 - Análise custo-benefício para 120 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	23361,95	2168,76	25530,71
2	24107,02	1764,37	25871,30
3	25227,72	1288,50	26516,22
4	26717,87	859,50	27577,37
5	27647,68	667,33	28315,01
6	28177,49	508,00	28685,49
7	28737,84	440,00	29177,84
8	29664,57	344,00	30008,57
9	30782,18	255,60	31037,78
10	31738,31	172,00	31910,31
11	36941,53	43,20	36984,73
12	37871,34	34,12	37905,46

Tabela 24 - Análise custo-benefício para 150 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	22850,86	2205,60	25056,46
2	23595,94	1797,18	25393,12
3	24713,55	1312,80	26026,35
4	26203,71	875,74	27079,45
5	27321,32	632,00	27953,32
6	27666,40	516,00	28182,40
7	28408,40	428,00	28836,40
8	29153,48	350,80	29504,28
9	30268,02	260,80	30528,82
10	31224,14	176,00	31400,14
11	36612,10	42,40	36654,50
12	37354,10	34,96	37389,06

Tabela 25 - Análise custo-benefício para 180 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	22678,44	2226,02	24904,46
2	23423,52	1809,57	25233,09
3	24544,22	1321,10	25865,32
4	26031,29	883,86	26915,15
5	27148,91	640,00	27788,91
6	27493,99	520,00	28013,99
7	28235,98	428,00	28663,98
8	29165,79	336,80	29502,59
9	30095,60	262,80	30358,40
10	31239,54	168,80	31408,43
11	36442,76	42,40	36485,16
12	37354,10	34,96	37389,06

Como foram adotados os mesmos fatores e critérios que foram utilizados na análise diferencial custo-benefício, os resultados foram iguais e pelos mesmos motivos a opção 2 é a ótima, também ressaltada em negrito.

5.6 - Resultados apresentados na aplicação da técnica de análise custo-benefício expandida

Em conformidade com o item 3.2.3, nas Tabelas 26 a 31 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da técnica de Análise Custo-Benefício Expandida.

As Tabelas 26 a 31 foram montadas uma para cada tempo de decaimento escolhido entre 30 e 180 dias.

Tabela 26 - Análise custo-benefício expandida para 30 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	28940,00	2186,13	31126,93
2	29679,72	8640,51	38320,23
3	30781,94	3813,99	34595,93
4	32105,84	2637,60	34743,44
5	33226,54	1936,05	35162,59
6	33571,66	1048,00	34619,66
7	34316,69	848,00	35164,69
8	35064,85	692,80	35757,65
9	36182,46	508,80	36691,26
10	37147,83	168,40	37316,23
11	42184,80	42,00	42226,80
12	42929,88	34,44	42964,32

Tabela 27 - Análise custo-benefício expandida para 60 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	25547,92	2211,97	27759,89
2	26292,99	8779,10	35072,09
3	27413,69	3882,00	31295,72
4	28906,92	2576,28	31483,20
5	29839,81	1995,87	31835,68
6	30369,62	1024,00	31393,62
7	30929,97	880,00	31809,97
8	31859,77	686,40	32546,17
9	32977,39	506,40	33483,79
10	33936,60	169,20	34105,80
11	38967,41	40,40	39007,81
12	39897,22	34,00	39931,22

Tabela 28 - Análise custo-benefício expandida para 90 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	23854,56	2216,27	26070,83
2	24787,45	8521,47	33308,91
3	25717,25	3966,00	29683,25
4	27210,49	2636,40	29846,89
5	28328,10	1947,24	30275,34
6	28740,70	1056,00	29796,70
7	29415,18	864,00	30279,18
8	30348,07	676,00	31024,07
9	31277,88	528,00	31805,88
10	32421,81	168,00	32589,81
11	37625,04	42,00	37667,04
12	38370,12	34,80	38404,92

Tabela 29 - Análise custo-benefício expandida para 120 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	23361,95	2168,76	25530,71
2	24107,02	8596,37	32703,39
3	25227,72	3808,50	29036,22
4	26717,87	2539,50	29257,37
5	27647,68	1971,33	29619,01
6	28177,49	1016,00	29193,49
7	28737,84	880,00	29617,84
8	29664,57	688,00	30352,57
9	30782,18	511,20	31293,38
10	31738,31	172,00	31910,31
11	36941,53	43,20	36984,73
12	37871,34	34,12	37905,46

Tabela 30 - Análise custo-benefício expandida para 150 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	22850,86	2205,60	25056,46
2	23595,94	8757,18	32353,12
3	24713,55	3881,07	28594,62
4	26203,71	2587,74	28791,45
5	27321,32	1896,00	29217,32
6	27666,40	1032,00	28698,40
7	28408,40	856,00	29264,40
8	29153,48	701,60	29855,08
9	30268,02	521,60	30789,62
10	31224,14	176,00	31400,14
11	36612,10	42,40	36654,50
12	37354,10	34,96	37389,06

Tabela 31 - Análise custo-benefício expandida para 180 dias de decaimento

OPÇÃO	CUSTO DE PROTEÇÃO ANUAL X US\$	CUSTO DO DETRIMENTO ANUAL Y US\$	CUSTO TOTAL (X+Y) US\$
1	22678,44	2226,02	24904,46
2	23423,52	8817,57	32241,09
3	24544,22	3905,22	28449,44
4	26031,29	2611,86	28643,15
5	27148,91	1920,00	29068,91
6	27493,99	1040,00	28533,99
7	28235,98	856,00	29091,98
8	29165,79	673,60	29839,39
9	30095,60	525,60	30621,20
10	31239,54	168,80	31408,43
11	36442,76	42,40	36485,16
12	37354,10	34,96	37389,06

Os resultados apresentados por esta técnica de análise são interessantes, pois mostram que mesmo pagando valores extras, os quais variam de 10 a 40 mil dolares que são somados ao valor de α de 10 mil dólares, à medida que se aumenta a dose individual, estes valores não são suficientes para deslocar a opção ótima que continua

sendo a opção 1. Por outro lado, como esta opção não pode ser adotada, por violar o limite de dose individual anual, a opção ótima torna-se a opção 3 e não a 2, como foi obtido com as técnicas de análise diferencial custo-benefício e análise custo-benefício.

5.7 - Resultados apresentados na aplicação da técnica de análise de prioridade com atributos múltiplos fazendo uso do método de avaliação direta

De conformidade com o item 3.2.4, nas Tabelas 32 a 38 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da técnica de Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos.

Lembramos que, pelo método de avaliação direta, os valores das constantes de crescimento k_j são: $k(X) = 0,692$, $k(T) = 0,214$, $k(D) = 0,019$ e $k(S)=0,075$.

As Tabelas 32 a 37 foram montadas uma para cada tempo de decaimento escolhido entre 30 e 180 dias.

Tabela 32 - Análise de prioridade com atributos múltiplos para 30 dias de decaimento

OPÇÃO	$u(x)$	$u(t)$	$u(d)$	$u(s)$	U
1	0,6900	0,0000	0,0000	0,0180	0,4787
2	0,6540	0,0000	0,4920	0,2040	0,4771
3	0,5990	0,0000	0,8370	0,4210	0,4619
4	0,5340	0,0000	0,9430	0,6070	0,4329
5	0,4790	0,0000	0,9740	0,7160	0,4036
6	0,4620	0,0000	0,9830	0,7760	0,3965
7	0,4250	0,0000	0,9890	0,8220	0,3744
8	0,3880	0,0000	0,9940	0,8570	0,3514
9	0,3330	0,0000	0,9980	0,8990	0,3163
10	0,2850	0,0000	1,0000	0,9380	0,2865
11	0,0300	0,0000	1,0000	0,9960	0,1137
12	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0947

Tabela 33 - Análise de prioridade com atributos múltiplos para 60 dias de decaimento

OPÇÃO	u(x)	u(t)	u(d)	u(s)	U
1	0,8580	0,2000	0,0000	0,0060	0,6369
2	0,8210	0,2000	0,4570	0,1920	0,6339
3	0,7660	0,2000	0,8250	0,4160	0,6196
4	0,6920	0,2000	0,9460	0,6170	0,5857
5	0,6460	0,2000	0,9710	0,7070	0,5612
6	0,6200	0,2000	0,9840	0,7810	0,5489
7	0,5920	0,2000	0,9890	0,8140	0,5321
8	0,5460	0,2000	0,9940	0,8590	0,5038
9	0,4910	0,2000	0,9980	0,9000	0,4689
10	0,4440	0,2000	1,0000	0,9380	0,4393
11	0,1950	0,2000	1,0000	0,9970	0,2714
12	0,1490	0,2000	1,0000	1,0000	0,2399

Tabela 34 - Análise de prioridade com atributos múltiplos para 90 dias de decaimento

OPÇÃO	u(x)	u(t)	u(d)	u(s)	U
1	0,9410	0,4000	0,0000	0,0040	0,7370
2	0,8950	0,4000	0,5220	0,2180	0,7308
3	0,8490	0,4000	0,8120	0,4030	0,7187
4	0,7760	0,4000	0,9430	0,6080	0,6860
5	0,7210	0,4000	0,9730	0,7140	0,6564
6	0,7000	0,4000	0,9830	0,7740	0,6466
7	0,6670	0,4000	0,9890	0,8180	0,6271
8	0,6210	0,4000	0,9940	0,8610	0,5986
9	0,5750	0,4000	0,9980	0,8950	0,5695
10	0,5180	0,4000	1,0000	0,9380	0,5330
11	0,2610	0,4000	1,0000	0,9960	0,3599
12	0,2250	0,4000	1,0000	0,9990	0,3352

Tabela 35 - Análise de prioridade com atributos múltiplos para 120 dias de decaimento

OPÇÃO	u(x)	u(t)	u(d)	u(s)	U
1	0,9660	0,6000	0,0000	0,0260	0,7987
2	0,9290	0,6000	0,5030	0,2100	0,7964
3	0,8740	0,6000	0,8360	0,4270	0,7810
4	0,8000	0,6000	0,9480	0,6230	0,7467
5	0,7540	0,6000	0,9720	0,7110	0,7218
6	0,7280	0,6000	0,9840	0,7830	0,7094
7	0,7000	0,6000	0,9890	0,8140	0,6925
8	0,6550	0,6000	0,9940	0,8580	0,6647
9	0,5990	0,6000	0,9980	0,8980	0,6291
10	0,5520	0,6000	1,0000	0,9370	0,5995
11	0,2950	0,6000	1,0000	0,9950	0,4261
12	0,2490	0,6000	1,0000	1,0000	0,3947

Tabela 36 - Análise de prioridade com atributos múltiplos para 150 dias de decaimento

OPÇÃO	u(x)	u(t)	u(d)	u(s)	U
1	0,9910	0,8000	0,0000	0,0090	0,8575
2	0,9540	0,8000	0,4620	0,1950	0,8546
3	0,8990	0,8000	0,8250	0,4160	0,8401
4	0,8250	0,8000	0,9450	0,6150	0,8061
5	0,7700	0,8000	0,9740	0,7270	0,7770
6	0,7530	0,8000	0,9840	0,7800	0,7693
7	0,7170	0,8000	0,9890	0,8200	0,7475
8	0,6800	0,8000	0,9940	0,8550	0,7246
9	0,6250	0,8000	0,9980	0,8960	0,6898
10	0,5780	0,8000	1,0000	0,9350	0,6593
11	0,3110	0,8000	1,0000	0,9960	0,4801
12	0,2750	0,8000	1,0000	0,9990	0,4554

Tabela 37 - Análise de prioridade com atributos múltiplos para 180 dias de decaimento

OPÇÃO	$u(x)$	$u(t)$	$u(d)$	$u(s)$	U
1	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,9060
2	0,9630	1,0000	0,4470	0,1890	0,9025
3	0,9070	1,0000	0,8220	0,4120	0,8875
4	0,8340	1,0000	0,9440	0,6120	0,8548
5	0,7790	1,0000	0,9740	0,7230	0,8257
6	0,7620	1,0000	0,9830	0,7780	0,8179
7	0,7250	1,0000	0,9890	0,8200	0,7952
8	0,6790	1,0000	0,9940	0,8610	0,7663
9	0,6330	1,0000	0,9980	0,8950	0,7380
10	0,5770	1,0000	1,0000	0,9380	0,7023
11	0,3200	1,0000	1,0000	0,9960	0,5287
12	0,2750	1,0000	1,0000	0,9990	0,4979

Em função dos intervalos de valores de X, T, D e S encontramos os valores das constantes de crescimento pelo método da avaliação direta, conforme item 3.2.4. Como os intervalos e consequentemente o valor da constante de crescimento para X e T , principalmente para X , são muito maiores do que o intervalo e o valor da constante de crescimento para D e S , era de se esperar que o resultado não se deslocasse do resultado obtido com as outras técnicas. Inclusive o próprio tempo de decaimento de 180 dias também era esperado, pois o valor da constante de crescimento T é relativamente maior do que as constantes de crescimento D e S , sendo também importante lembrar que foi dada pontuação máxima para este tempo de decaimento quando da construção da curva de prioridade relativa ao tempo de decaimento. Assim sendo, como a opção 1 não pode ser adotada, por violar o limite de dose individual anual, a opção ótima torna-se a opção 2 relativa ao tempo de decaimento de 180 dias.

5.8 - Resultados apresentados pela análise de sensibilidade das constantes de crescimento

De conformidade com o item 4.1, nas Tabelas 38 a 42 são apresentados os resultados obtidos com a Análise de Sensibilidade das constantes de crescimento k_j .

Para os quatro conjuntos de constantes de crescimento, abaixo, foi encontrada a mesma opção ótima. O resultado é fornecido na Tabela 38.

$k(X) = 0,45, k(T) = 0,05, k(D) = 0,45 k(S) = 0,05$
 $k(X) = 0,5, k(T) = 0, k(D) = 0,5 k(S) = 0$
 $k(X) = 0,6, k(T) = 0, k(D) = 0,4 k(S) = 0$
 $k(X) = 0,4, k(T) = 0, k(D) = 0,6 k(S) = 0$

Tabela 38 - Análise de sensibilidade das constantes de crescimento

TEMPO (DIAS)	180
OPÇÃO	4
TAXA DE DOSE (Sv/ANO)	0,0216
CUSTO (US\$)	26031,29

A dose refere-se ao grupo de trabalhadores que recebe a maior dose.

A adoção do valor mínimo de 0,1 para as constantes de crescimento, conforme tabelas a seguir, está explicada na parte final do item 4.1.

Tabela 39 - Análise de sensibilidade das constantes de crescimento para valores de:

$$k(X) = 0,7, \quad k(T) = 0,1, \quad k(D) = 0,1 \quad k(S) = 0,1$$

TEMPO (DIAS)	180
OPÇÃO	3
TAXA DE DOSE (Sv/ANO)	0,0323
CUSTO (US\$)	24544,22

Tabela 40 - Análise de sensibilidade das constantes de crescimento para valores de:

$$k(X) = 0,1, \quad k(T) = 0,7, \quad k(D) = 0,1 \quad k(S) = 0,1$$

TEMPO (DIAS)	180
OPÇÃO	8
TAXA DE DOSE (Sv/ANO)	$8,42 \times 10^{-03}$
CUSTO (US\$)	29165,79

Tabela 41 - Análise de sensibilidade das constantes de crescimento para valores de:

$$k(X) = 0,1, \quad k(T) = 0,1, \quad k(D) = 0,7 \quad k(S) = 0,1$$

TEMPO (DIAS)	180
OPÇÃO	10
TAXA DE DOSE (Sv/ANO)	$4,22 \times 10^{-03}$
CUSTO (US\$)	31239,54

Tabela 42 - Análise de sensibilidade das constantes de crescimento para valores de:

$$k(X) = 0,1, \quad k(T) = 0,1, \quad k(D) = 0,1 \quad k(S) = 0,7$$

TEMPO (DIAS)	180
OPÇÃO	11
TAXA DE DOSE (Sv/ANO)	$1,06 \times 10^{-03}$
CUSTO (US\$)	36442,76

5.9 - Importância relativa dos atributos considerando a importância máxima de cada constante de crescimento e seus valores no método lógico

Na Figura 3 é apresentada a importância relativa dos atributos pelo estudo da sensibilidade das constantes de crescimento para as cinco situações enumeradas a seguir em função dos níveis de dose para o grupo que recebe a maior dose.

LOG - $k(X)=0,45 \quad k(T)=0,05 \quad k(D)=0,45 \quad k(S)=0,05$

X - $k(X)=0,7 \quad k(T)=0,1 \quad k(D)=0,1 \quad k(S)=0,1$

T - $k(X)=0,1 \quad k(T)=0,7 \quad k(D)=0,1 \quad k(S)=0,1$

D - $k(X)=0,1 \quad k(T)=0,1 \quad k(D)=0,7 \quad k(S)=0,1$

S - $k(X)=0,1 \quad k(T)=0,1 \quad k(D)=0,1 \quad k(S)=0,7$

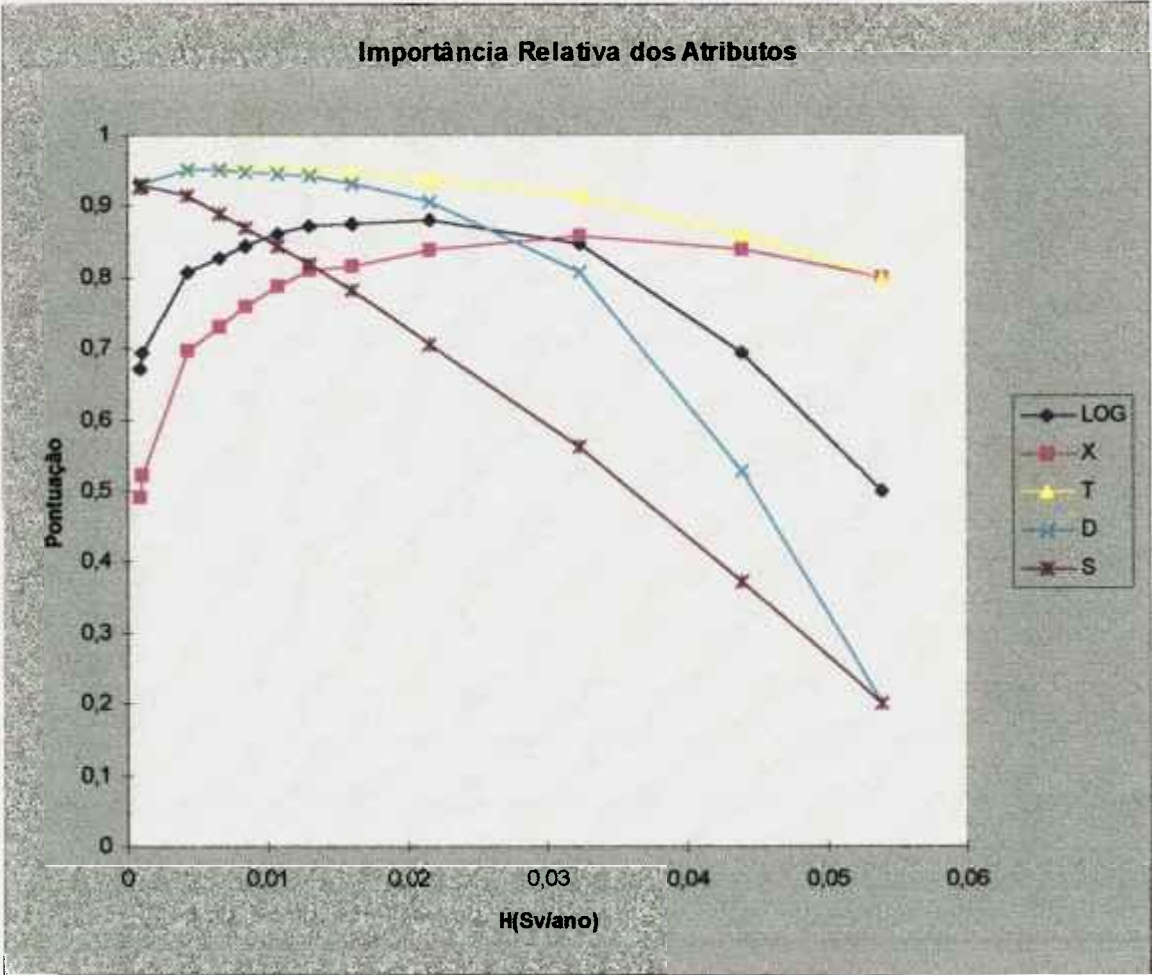


Figura 3 - Importância Relativa dos Atributos

5.10 - Resultados apresentados pela análise de sensibilidade dos juros anuais

De conformidade com o item 4.2, na Tabela 43 é apresentado o resultado obtido com a Análise de Sensibilidade dos juros anuais adotando para as constantes de crescimento o método lógico.

Tabela 43 - Análise de sensibilidade dos juros anuais

Juros Anuais (%)	Opção	Tempo	Dose (Sv/ano)	Custo (US\$)
0	6	180	0,0130	27493,99
3	6	180	0,0130	27493,99
6	4	180	0,0216	26031,29
9	4	180	0,0216	26031,29
12	4	180	0,0216	26031,29

Com o intuito de verificar a partir de que taxa de juros haveria a mudança da opção ótima de 4 para 6 e se haveria um intervalo também para a opção 5 foi feito um estudo variando a taxa de juros de 3% a 5% e o resultado está apresentado na Tabela 44.

Tabela 44 - Análise de sensibilidade dos juros anuais

Juros Anuais (%)	Opção
3	6
3,5	4
4	4
5	4

5.11 - Resultados apresentados pela análise de sensibilidade do valor de α

De conformidade com o item 4.3, na Tabela 45 é apresentado o resultado obtido com a Análise de Sensibilidade do valor de α , lembrando que foi utilizada a técnica de análise custo-benefício como foi explicado naquele item.

Tabela 45 - Análise de sensibilidade dos valores de α

Valor de α (US\$)	Opção
3.000,00	2
10.000,00	2
20.000,00	2
25.000,00	3

Com o intuito de verificar a partir de que valor de α haveria a mudança da opção ótima de 2 para 3, foi feito um estudo variando o valor de α de 20 a 25 mil dolares e o resultado está apresentado na Tabela 46.

Tabela 46 - Análise de sensibilidade dos valores de α

Valor de α (US\$)	Opção
22.000,00	2
22.900,00	2
23.000,00	3
25.000,00	3

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1. - Discussão dos resultados

6.1.1 - Análise Diferencial Custo-Benefício

Com a primeira técnica aplicada a todos os tempos de decaimento, foram considerados apenas o custo de proteção e a dose coletiva, pois o objetivo de tal técnica é justamente verificar diferenças na dose coletiva e no custo de proteção de um nível para o outro, de modo que $\Delta X/\Delta S \leq \alpha$, onde α é o custo do detrimento por unidade de dose equivalente coletiva.

Contudo, como no nosso caso todas as opções encontradas são maiores que α , significa que temos de desembolsar mais que o valor de α , que é o oficialmente exigido no país.

Os outros dois **fatores** a saber, distribuição de dose individual e tempo de decaimento, devem ser tratados qualitativamente para se chegar à solução final. Trata-se de verificar se um destes **fatores** ou ambos tem importância suficiente para deslocar a **opção** ótima para outra de numeração superior.

Como os **fatores** e **critérios** usados nesta técnica de ajuda para a tomada de decisão são idênticos àqueles usados na análise custo-benefício, a discussão qualitativa dos **fatores** distribuição de dose individual e tempo de decaimento será deixada para o próximo item, 6.1.2.

6.1.2 - Análise Custo-Benefício

O que diferencia a técnica de Análise Custo-Benefício da técnica de Análise Diferencial Custo-Benefício é que na Análise Custo-Benefício os fatores que influenciam uma decisão são expressos em termos monetários. Desta maneira, foi necessário introduzir o **critério** α para transformar a dose coletiva em custo do detrimento biológico Y . Teremos como solução ótima, então, a que apresentar $(X + \alpha S)$ mínimo.

No caso em estudo, como o custo anual do detrimento $Y = \alpha S$ é função da dose coletiva que não variou com relação àquela usada na análise diferencial custo-benefício, a solução ótima se manteve a mesma, e as discussões aqui realizadas são válidas também para a análise efetuada em 6.1.1.

Em virtude do resultado ter apresentado a opção 2 como a ótima, resta agora estabelecer o tempo de decaimento ideal. Para isto, com os dados das Tabelas 20 a 25, opção 2, montou-se a Tabela 47 que será aqui discutida.

Tabela 47 - Custos de proteção e de detrimento para diferentes tempos de decaimento e para a opção 2

TEMPO DE DECAIMENTO (DIAS)	CUSTO DE PROTEÇÃO X (US\$)	CUSTO DO DETRIMENTO Y (US\$)	CUSTO TOTAL (X+Y) (US\$)
30	29.680,00	1.777,00	31.457,00
60	26.292,00	1.803,00	28.095,00
90	24.787,00	1.748,00	26.535,00
120	24.107,00	1.764,00	25.871,00
150	23.596,00	1.797,00	25.393,00
180	23.423,00	1.810,00	25.233,00

Do ponto de vista do custo do detrimento, evidentemente a melhor opção é aquela que apresenta o decaimento de 90 dias, pois apresenta o menor valor. Por outro lado, do ponto de vista de custo de proteção, seria aquela que apresenta o decaimento de 180 dias. Para efetuar uma escolha racional o preferível é adotar como ótimo aquela que apresenta um tempo de decaimento que forneça $(X+Y)_{\min}$.

Pela última coluna vemos que o tempo ideal é 180 dias. Portanto a solução analítica é opção 2, tempo de decaimento 180 dias.

Falta-nos agora discutir se a introdução qualitativa dos dois fatores que não foram considerados na análise são suficientemente fortes para deslocar a opção ótima de número 2 e decaimento 180 dias para uma outra de número superior.

Evidentemente a opção que deve ser almejada em primeira instância é a opção 6, pois as opções 3 e 5 aumentam o custo total sem nenhuma vantagem do ponto de vista operacional enquanto que a opção 6 elimina a necessidade de **monitoração individual com função controladora** e possibilita a aplicação das novas normas internacionais (25, 26, 27) . Desta maneira, montamos uma tabela análoga à Tabela 47 com todos os dados da opção 6 tirados das Tabelas 20 a 25 e 8 a 13 para as doses individuais anuais máximas.

Tabela 48 - Custos de proteção e de detrimento para diferentes tempos de decaimento e para a opção 6

TEMPO DE DECAIMENTO (DIAS)	CUSTO DE PROTEÇÃO X (US\$)	DOSE INDIVIDUAL MÁXIMA (mSv/ano)	CUSTO DO DETRIMENTO Y (US\$)	CUSTO TOTAL (X+Y) (US\$)
30	33.572,00	13,1	524,00	34.096,00
60	30.370,00	12,8	512,00	30.882,00
90	28.741,00	13,2	528,00	29.269,00
120	28.177,00	12,7	508,00	28.685,00
150	27.666,00	12,9	516,00	28.182,00
180	27.494,00	13,0	520,00	28.014,00

Desta tabela ve-se que do ponto de vista de dose individual máxima e custo de detrimento a opção preferível seria aquela que apresenta um decaimento de 120 dias enquanto que para o custo de proteção radiológica e custo total seria de 180 dias. Se adotarmos esta como preferível por ter menor custo total e menor custo de proteção teremos o seguinte prejuízo no que se refere à dose individual máxima e ao custo do detrimento:

a) um acréscimo da dose individual máxima de 12,7 para 13,0 mSv/ano, isto é, 2,4% o que é desprezível em face ao erro de medida considerado ser cerca de 25%.

b) custo de detrimento $520,00 - 508,00 = \text{US\$}12,00$.

Como o prejuízo destes dois fatores é pequeno comparado com o prejuízo do custo de proteção e custo total, se fosse escolhido o caso de 120 dias de decaimento torna-se evidente que a opção a ser eleita seria de 180 dias de decaimento.

Neste caso o fator tempo de decaimento não justifica o deslocamento da opção 2 para a opção 6, pois não há alteração nele.

Resta então verificar se a distribuição de dose justifica este deslocamento. Das Tabelas 47 e 48 verifica-se que o aumento nos custos de proteção, diminuição de custo de detrimento e aumento de custo total para 180 dias de decaimento e passar de uma dose individual máxima de 43,8mSv/ano para 13,0mSv/ano são:

a) custo de proteção X: $27.494,00 - 23.423,00 = 4071,00 \text{ US\$/ano}$

b) custo do detrimento Y: $520,00 - 1810,00 = - 1290,00 \text{ US\$/ano}$

c) custo total (X+Y): $28.014,00 - 25.233,00 = 2781,00 \text{ US\$/ano}$

Em outras palavras, podemos dizer que se deslocarmos a escolha da opção 2 para a opção 6 teremos 17,4% de aumento no custo de proteção no ano e 11% de aumento no custo global por ano.

Cabe ao tomador de decisão aceitar ou não este deslocamento, em função de suas disponibilidades financeiras e tendo em mente que, após a operacionalização das celas de manipulação, deverá obrigatoriamente modificar o procedimento operacional e ou o projeto, tentando diminuir as doses inicialmente até 3/10 do limite anual e posteriormente até 1/10 como mandam as normas nacionais e internacionais (25, 26, 27)

Para chegar ao valor de dose individual máximo de 1/10, se não desejar fazer otimizações nos procedimentos de operação, o tomador de decisão deverá, escolher a opção 10 que, para 180 dias de decaimento, terá um acréscimo no custo anual de proteção e custo total com relação à opção 2 de:

a) custo de proteção X: $31.240,00 - 23.423,00 = 7.817,00$ US\$/ano

b) custo total (X+Y): $31.408,00 - 25.233,00 = 6.175,00$ US\$/ano

que equivale a 33,4% por ano no custo de proteção e 24,5% por ano no custo total.

6.1.3 - Análise Custo-Benefício Expandida

Se observarmos as Tabelas 8 a 13, perceberemos que a solução ótima obtida com as técnicas anteriores nos fornece um quadro onde os quatro trabalhadores mais próximos das celas recebem doses muito elevadas com relação ao restante do grupo. Em todos os tempos de decaimento, estes quatro trabalhadores se encontram em condição de trabalho A, o que não é recomendado pela atual filosofia de proteção radiológica.

Desta maneira, é importante que se considere o fator distribuição das doses individuais pelos trabalhadores, sendo esta justamente a razão pela qual utilizamos, neste trabalho, a Análise Custo-Benefício Expandida, pois com as técnicas anteriores não temos como avaliar quantitativamente este fator.

O resultado obtido com esta técnica é a opção 3 para todos os tempos de decaimento, conforme pode ser constatado nas Tabelas 26 a 31. Porém, se novamente observarmos as Tabelas 8 a 13, perceberemos que as doses ainda estão dentro da condição de trabalho A, o que em outras palavras significa que mesmo pagando US\$20.000,00 além dos US\$10.000,00 da norma nacional para doses nesta faixa, ainda assim vale a pena mantê-las. Se agora considerarmos qualitativamente o tempo de

decaimento vemos que a opção 3 ótima é de 180 dias. Para a tomada de decisão pelo responsável deveríamos repetir as considerações feitas no item 6.1.2 com respeito ao deslocamento para as opções 6 e 10 respectivamente, considerando os seus aumentos nos custos.

6.1.4 - Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos

Esta técnica é muito interessante pelo fato de que ao contrário das outras, ela nos permite introduzir tantos fatores quantos forem necessários com a vantagem de não ser obrigatório atribuir um valor monetário a estes fatores. Com esta técnica foi possível introduzir o fator tempo de decaimento à análise.

O resultado obtido foi tempo de 180 dias opção 2, conforme Tabelas 32 a 37. Esta opção fornece ainda valores de dose que se encontram dentro da condição de trabalho A. Analisando os valores encontrados para as constante de crescimento, pelo método de avaliação direta (18), percebemos que foi atribuída uma constante de crescimento relativamente pequena para o fator distribuição da dose, pois este fator é justamente o mais importante deles quando encaramos o problema do ponto de vista da filosofia de proteção radiológica. Por outro lado foi atribuída uma constante de crescimento muito grande para o fator tempo de decaimento, tendo em vista que sua importância está diretamente ligada ao custo de proteção, ou seja, sabemos que quanto maior for o tempo de decaimento menor será a dose e menor será o custo. A opção ótima continua fornecendo valores de dose altos (condição de trabalho A), que não é o que se pretende e por este motivo é que julgamos necessário realizar uma análise de sensibilidade das constantes de crescimento, conforme capítulo 4.

6.1.5 - Análise de Sensibilidade das Constantes de Crescimento k_j

Esta análise tem por finalidade atribuir valores mais coerentes às constantes de crescimento e verificar de que maneira se comportam os resultados. Os quatro conjuntos de valores atribuídos, discutidos no capítulo 4, apresentaram o mesmo resultado, ou seja, opção 4, 180 dias de decaimento, conforme Tabela 38. Pelo fato de a dose se encontrar dentro da condição de trabalho A, atribuímos importância máxima a cada constante de crescimento isoladamente. Quando damos importância máxima a $k(X)$, conforme Tabela 39, o resultado retrograde apenas de uma opção, ou seja de 4 volta para 3. Este resultado é plausível, uma vez que se procura soluções mais baratas do ponto de vista de custo de proteção. Quando damos importância máxima ao tempo de decaimento, conforme Tabela 40, vemos que a opção ótima desloca-se de 4 para 8; isto demonstra que esta variável é sensível e variações de 0,1 a 0,7 faz com que a opção ótima se desloque de 4 até 8. Quando damos importância máxima a $k(D)$, conforme Tabela 41, o resultado desloca-se da opção 4 para a opção 10, o que é bastante interessante do ponto de vista de proteção radiológica, pois nesta opção o nível de dose está abaixo do nível de registro que é o objetivo final da otimização. Por outro lado isto evidencia que esta constante de crescimento é bastante sensível a variações. Por fim vemos que o $k(S)$ é a mais sensível de todas as constantes de crescimento uma vez que deslocou a opção ótima para 11 nível de dose praticamente do público.

De tudo isto podemos extrair uma observação importante que vem comparando estes resultados com os intervalos de variação dos **atributos** usados no método de avaliação direta. Parece que a sensibilidade é inversamente proporcional ao intervalo de variação do atributo a não ser no caso da distribuição de dose D, que houve uma inversão quando comparada com a dose coletiva. Em virtude disto resolveu-se fazer um estudo da importância relativa dos **atributos** cujos resultados foram mostrados no item 5.9 e apresentados na Figura 3 que passaremos a discutir. Os **atributos** que mais influenciam na maximização de U são, para a opção 1, T e X e os que menos

influenciam são S e D. A partir da opção 2 até a opção 8 o atributo que mais influencia é o T e a partir da 9 até a 11 são o T e o D. Até a opção 5 a partir da opção 2 o que menos contribui é S e a partir da 6 até a 11 o fator que menos contribui é o X.

Assim sendo, por esta análise podemos perceber que embora dando pouca importância ao fator tempo de decaimento este é o fator predominante o que é bastante lógico, pois é por meio dele que teremos uma variação na espessura de blindagem e consequentemente no custo de proteção radiológica. Por esta análise o resultado ótimo seria a opção 8, conforme Tabela 40 que equivale ao ponto máximo da curva referente ao T. Porém este resultado, conforme tabela 40, nos leva a um valor de dose maior do que o nível de registro e, portanto, existe ainda a necessidade de se continuar o processo de otimização começando com alterações nos procedimentos de trabalho, porém por meio de um exame análogo à aquele feito em 6.1.2 vê-se que o custo de proteção X e o custo total $X+Y$ teriam um acréscimo de 2.074,00US\$ por ano e 1.905,00 US\$ por ano respectivamente se deslocássemos a opção 8 para a opção 10, como pode ser verificado na Tabela 25. Em porcentagem de custo por ano seria de 7,1% e de 6,5% respectivamente.

6.1.6 - Análise de Sensibilidade das Taxas de Juros

Conforme pode ser observado na Tabela 44 do capítulo 5, para juros anuais menores do que 3,5%, a opção ótima deixa de ser a opção 4, solução encontrada com a análise de sensibilidade das constantes de crescimento conforme Tabela 38, e passa a ser a opção 6. Nesta opção estamos dentro da condição de trabalho B e portanto atendemos a CIPR 60 ⁽¹³⁾, porém devemos continuar o processo de otimização, agora da operação, com a finalidade de se alcançar o nível de registro. Com juros maiores do que 3,5%, a solução se mantém a mesma que a encontrada com os quatro primeiros conjuntos adotados na análise de sensibilidade das constantes de

crescimento, ou seja, opção 4 que também é a mais robusta, pois compreende quase 75% do intervalo de variação dos juros. É digno de nota que não existe um intervalo ótimo nos juros para a opção 5; isto provavelmente se deve ao fato de que as doses anuais individuais máximas oscilam entre 15 e 16 mSv/ano e portanto muito próximas ao valor onde os custos sofrem uma variação brusca somada pela eliminação da **monitoração de área com função controladora**.

6.1.7 - Análise de Sensibilidade do critério α

Conforme pode ser observado na Tabela 25, percebemos que para 180 dias de decaimento com a técnica de custo-benefício a opção ótima é a opção 2. Se observarmos a Tabela 46 veremos que esta solução se mantém entre US\$3.000,00 e US\$22.900,00, sendo alterada para a opção 3 apenas quando atribuímos valores maiores ou iguais a US\$23.000,00, sendo que este valor está muito próximo ao valor máximo, adotado para α atualmente pelos japoneses, que é de US\$25.000,00. Desta maneira podemos dizer que a solução analítica da análise custo-benefício é robusta com relação ao critério α .

6.2 - Conclusões

A partir da Análise de Sensibilidade das constantes de crescimento, podemos concluir que as autoridades competentes do País devem participar dos processos de otimização desde a escolha dos fatores relevantes até a solução final, pois no caso em estudo podemos chegar a duas soluções, a saber:

1) Adotar tempo de decaimento de 180 dias, opção 4, dose de 21,6 mSv/ano, custo de proteção por ano de US\$26.031,29 e custo total de US\$26.915,15 por ano.

Esta solução de otimização do projeto se mostrou robusta embora apresente valores de dose que se encontram dentro da condição de trabalho A. Desta maneira, as autoridades competentes devem exigir uma continuidade no processo de otimização, agora de operação, com a finalidade de se obter valores de dose equivalentes ao nível de registro.

2) Adotar tempo de decaimento de 180 dias, opção 10, dose de 4,22 mSv/ano, custo de proteção por ano de US\$31.239,54 e custo total de US\$31.408,43 por ano.

Neste caso embora o custo aumente em aproximadamente US\$4.500,00 por ano, o valor encontrado para a dose está abaixo do nível de registro (5×10^{-3} Sv), portanto encerra-se aqui o processo de otimização.

Ainda a partir da análise de sensibilidade das constantes de crescimento, concluímos que a proteção radiológica não escolheria a opção 11 pelo fato de que embora a dose seja menor que a fornecida pela opção 10, o acréscimo no custo não seria justificado, pois não existe nenhum retorno para este esforço.

Do trabalho como um todo podemos concluir:

- a) As técnicas de otimização, embora envolvam aspectos subjetivos, são de extrema importância pois nos fornecem toda a linha de pensamento seguida na escolha de uma opção, sendo justamente este o seu maior mérito.
- b) Estas técnicas são apenas ferramentas de ajuda na tomada de decisão e não constituem por si só uma decisão, fato este demonstrado pela multiplicidade de opções ótimas, função dos **atributos** e **critérios** adotados.
- c) O número de **fatores** a serem considerados depende da complexidade do problema e do custo envolvido. O custo envolvido no processo de otimização não pode ser superior ao custo de proteção. No caso disto ocorrer não se justifica o processo de otimização (18).
- d) À medida que a complexidade do problema e os custos aumentam é fundamental que se conheça o maior número possível de **fatores** relevantes e suas consequências. Neste caso serão exigidas as técnicas mais complexas como a análise custo-benefício expandida e análise de prioridade com atributos múltiplos.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Após a entrada em operação das duas celas de manipulação, os seguintes trabalhos deverão ser tomados em consideração:

- 1) Verificar se os custos de proteção X para a **opção** escolhida são realmente aqueles estimados para aquela **opção**. Em caso contrário identificar as diferenças para em um próximo cálculo de otimização ser mais realista.
- 2) Verificar se as doses e distribuição de doses na operação das celas são efetivamente aquelas que foram estimadas para os diferentes grupos de trabalhadores para a **opção** ótima. Em caso contrário, identificar o por quê e onde houve a falha na posição das doses.
- 3) No caso que houver diferenças nos custos de proteção previstos e os realmente gastos ou nas doses e distribuição de doses previstas e reais, proceder a uma nova otimização com novas opções corrigidas para serem mais realistas e verificar a defasagem entre a **opção** ótima agora calculada e a anterior.
- 4) Estudar a possibilidade de se poder generalizar a solução ótima para diferentes tamanhos de celas, diferentes radioisótopos e outros intervalos de **atividade**.
- 5) Para os casos em que é possível a generalização da solução ótima, estudar os seus parâmetros com a finalidade de estabelecer uma norma e evitar que outros refaçam o mesmo caminho, isto é, aqueles que obedecerem à norma, nas condições por ela estabelecida, não necessitariam efetuar os cálculos de otimização uma vez que já estariam otimizados.
- 6) Completar o programa de micro computador para que se evite os cálculos manuais.

7) Estudar a possibilidade de se adaptar os programas de micro computador de maneira tal a possibilitar que possam resolver os cálculos de otimização para diferentes tipos e dimensões de celas.

APÊNDICE 1

DEFINIÇÕES

Atividade - (de uma quantidade de radionuclídeo, em um determinado estado de energia e instante de tempo) - grandeza expressa por:

$$A = dN/dt$$

onde:

dN: valor médio esperado do número de transições nucleares daquele estado de energia no intervalo de tempo dt.

As unidades de atividade são:

Sistema Internacional: s^{-1}

Unidade antiga: Curie (Ci) ($1Ci = 3,7 \times 10^{10} s^{-1}$)

Unidade atual: Becquerel (Bq) ($1Bq = 1 s^{-1}$)

Atributo -equivalente a fator; usado na frase técnica análise de prioridade com atributos múltiplos

Caminho Livre Médio - é o valor médio da distância percorrida por uma partícula entre duas colisões consecutivas .

Coefficiente de Atenuação de Massa (μ/ρ) - de um material para partículas ionizantes não carregadas, é o quociente de dN/N por ρdl , onde dN/N é a fração de partículas que sofre interação ao atravessar a distância dl num material de densidade ρ .

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl}$$

Crêterios - uma medida quantitativa ou qualitativa do que   aceitável ou desejável para um ou mais dos fatores, por exemplo, limites de doses individuais, um valor específico da unidade de dose coletiva. Este  , então, a base em que pode ser comparado o desempenho ou o custo de uma op o.

Dose Absorvida - grandeza expressa por:

$$D = d\bar{\epsilon} / dm$$

onde:

$d\bar{\epsilon}$: energia média depositada pela radia o em um volume elementar de m teria de massa dm

As unidades de dose Absorvida são:

Sistema Internacional: J/kg.

Unidade antiga: Rad (1 Rad = 10^{-2} J/kg)

Unidade atual: Gray (Gy) (1Gy = 1 J/kg)

Dose Equivalente - grandeza equivalente a dose absorvida no corpo humano modificada de modo a constituir uma avalia o do efeito biológico da radia o, sendo expressa por:

$$H = D.Q$$

onde:

D: dose absorvida num ponto de interesse do tecido ou órgão humano.

Q: fator de qualidade da radia o no ponto de interesse.

As unidades de Dose Equivalente são:

Sistema Internacional: J/kg

Unidade antiga: rem (1 rem = 10^{-2} J/kg)

Unidade atual: Sievert (Sv) (1Sv = 1 J/kg)

Dose Equivalente Efetiva - grandeza expressa por:

$$H_E = \sum_T w_T \bar{H}_T$$

onde:

w_T : fator de ponderação para o tecido ou órgão T

$\bar{H}_T$: dose equivalente média no tecido ou órgão T.

Exposição - é o quociente de dQ por dm onde dQ é o valor absoluto da carga total dos ions de um mesmo sinal, produzidos no ar quando todos os elétrons liberados pelos ftons no ar de massa dm são completamente freados no ar.

$$X = dQ/dm$$

As unidades de exposição são:

Sistema Internacional: C/kg

Unidade antiga: Roëntgen (R) ($1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$)

Fatores - uma medida identificada do custo ou do desempenho, por exemplo custo financeiro, dose coletiva, dose individual máxima. Em física ou matemática prefere-se o uso de variável ou parâmetro como sinônimo de fator.

Monitoração de Área com Função Controladora - pretende mostrar que o ambiente de trabalho é:

- satisfatório para operações contínuas
- não sofreu nenhuma mudança que possa exigir uma reavaliação dos procedimentos de operação

- procura avaliar a dose equivalente individual para compara-la com a dose individual estimada.

Monitoração Individual com Função Controladora - visa obter uma estimativa da:

- dose equivalente efetiva
- dose equivalente média num tecido apreciavelmente irradiado.

Em outras palavras, pretende estimar a dose de um determinado trabalhador por medidas contínuas ou regularmente repetidas.

Opção ou Opção de Proteção - um projeto específico ou um conjunto de procedimentos operacionais específicos.

Queima - total do combustível irradiado durante todo o período de permanência da miniplaca combustível no reator.

Taxa de Dose Equivalente - é o quociente de dH por dt , onde dH é o incremento de dose equivalente no intervalo dt .

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt}$$

As unidades de taxa de dose equivalente são:

Sistema Internacional: J/kg.s

Unidade antiga: rem/s

Unidade atual: Sv/s

Taxa de Exposição - é o quociente de dX por dt , onde dX é o incremento de exposição no intervalo de tempo dt .

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

As unidades de taxa de exposição são:

Sistema Internacional: C/kg.s

Unidade antiga: R/s

APÊNDICE 2

PROGRAMA DE COMPUTAÇÃO PARA APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Este programa foi desenvolvido em linguagem FORTRAN, tem a finalidade de facilitar os cálculos de otimização da proteção radiológica sempre que se usar uma das seguintes técnicas:

- Análise Diferencial Custo-Benefício
- Análise Custo-Benefício
- Análise Custo-Benefício Expandida
- Análise de Prioridade com Atributos Múltiplos

1 - Análise Diferencial Custo-Benefício

Dados de entrada:

- 1- número de opções
- 2- vida útil da instalação n [anos]
- 3- taxa de juros γ
- 4- custo total de proteção para cada opção X_t [US\$]
- 5- número de trabalhadores
- 6- dose individual anual H de cada trabalhador para cada opção [Sv] e quando esta não for conhecida pode-se entrar com a somatória das doses individuais dividida pelo número de trabalhadores

Cálculos Realizados pelo Programa:

- 1 - Cálculo do custo de proteção anualizado X de cada opção.

$$X = X_t \cdot \left[\frac{\gamma(1-\gamma)^n}{(1+\gamma)^n - 1} \right] \text{ [US$]}$$

- 2 - Cálculo da diferença de custo anual de proteção ΔX_i

$$\Delta X_i = X_i - X_{(i-1)} \text{ [US$]}$$

- 3 - Cálculo da dose anual individual média de cada opção.

$$\bar{H} = \frac{\sum H}{n} \text{ [Sv]}$$

4 - Cálculo da dose coletiva anual de cada opção.

$$S = \overline{H} \cdot n \quad [\text{Sv-pessoa}]$$

5 - Cálculo da diferença de dose coletiva anual ΔS_i

$$\Delta S_i = S_i - S_{(i-1)} \quad [\text{Sv-pessoa}]$$

6 - Cálculo da razão $\Delta X_i / \Delta S_i$ [US\$ (Sv-pessoa)⁻¹]

Dados de Saída

Tabela contendo: - número de opções

- X [US\$] de cada opção
- ΔX [US\$] de cada opção
- S [Sv-pessoa] de cada opção
- ΔS [Sv-pessoa] de cada opção
- $\Delta X_i / \Delta S_i$ [US\$ (Sv-pessoa)⁻¹] de cada opção

2 - Análise Custo-Benefício

Dados de entrada:

- 1 - número de opções
- 2 - vida útil da instalação n [anos]
- 3 - taxa de juros γ
- 4 - custo total de proteção para cada opção X_i [US\$]
- 5 - número de trabalhadores
- 6 - dose individual anual H de cada trabalhador para cada opção [Sv] e quando esta não for conhecida pode-se entrar com a somatória das doses individuais dividida pelo número de trabalhadores
- 7 - valor do termo α [US\$ (Sv-pessoa) $^{-1}$]

Cálculos Realizados pelo Programa:

- 1 - Cálculo do custo de proteção anualizado X de cada opção.

$$X = X_i \cdot \left[\frac{\gamma(1+\gamma)^n}{(1+\gamma)^n - 1} \right] \text{ [US$]}$$

- 2 - Cálculo da dose anual individual média de cada opção.

$$\bar{H} = \frac{\sum H}{n} \text{ [Sv]}$$

- 3 - Cálculo da dose coletiva anual de cada opção.

$$S = \bar{H} \cdot n \text{ [Sv-pessoa]}$$

4 - Cálculo do custo do detrimento biológico Y de cada opção

$$Y = \alpha S \text{ [US\$]}$$

5 - Cálculo de X+Y [US\$]

Dados de Saída

Tabela contendo: - número de opções

- X [US\$] de cada opção
- Y [US\$] de cada opção
- X+Y [US\$] de cada opção

3 -Análise Custo-Benefício Expandida

Dados de entrada:

- 1 - número de opções
- 2 - vida útil da instalação n [anos]
- 3 - taxa de juros γ
- 4 - custo total de proteção para cada opção X_t [US\$]
- 5 - número de trabalhadores
- 6 - dose individual anual H de cada trabalhador para cada opção [Sv] e quando esta não for conhecida pode-se entrar com a somatória das doses individuais dividida pelo número de trabalhadores
- 7 - valor do termo α [US\$ (Sv-pessoa)⁻¹]
- 8 - número de grupos J
- 9 - número de pessoas por grupos n_j
- 10 - dose individual anual H_j do trabalhador de cada grupo para cada opção [Sv] e quando esta não for conhecida pode-se entrar com a somatória das doses individuais dividida pelo número de trabalhadores
- 11 - número de intervalos de dose
- 12 - valores dos intervalos de dose [Sv]
- 13 - valor do termo β para cada intervalo de dose [US\$ (Sv-pessoa)⁻¹]

Cálculos realizados pelo programa:

- 1 - Cálculo do custo de proteção anualizado X de cada opção.

$$X = X_t \cdot \left[\frac{\gamma(1+\gamma)^n}{(1+\gamma)^n - 1} \right] \text{ [US\$]}$$

2 - Cálculo da dose anual individual média de cada opção.

$$\bar{H} = \frac{\sum H}{n} \text{ [Sv]}$$

3 - Cálculo da dose coletiva anual de cada opção.

$$S = \bar{H} \cdot n \text{ [Sv-pessoa]}$$

4 - Cálculo da dose anual individual média de todos os grupos de cada opção.

$$\bar{H}_J = \frac{\sum H_J}{n_J} \text{ [Sv]}$$

5 - Cálculo da dose coletiva anual de todos os grupos de cada opção.

$$S_J = \bar{H}_J \cdot n_J \text{ [Sv-pessoa]}$$

6 - Cálculo do custo do detrimento biológico Y de cada opção

$$Y = \alpha S + \sum_j \beta_j \cdot S_j \text{ [US\$]}$$

Neste cálculo o programa identifica para cada grupo de uma opção a dose individual média $\bar{H}_j$, verifica a qual intervalo de dose pertence, identifica o β e multiplica o valor deste β pela dose coletiva S_j correspondente ao grupo em questão. Após concluída esta etapa para todos os grupos da opção o programa adiciona o termo αS .

7 - Cálculo de X+Y [US\$]

Dados de Saída

Tabela contendo: - número de opções

- X [US\$] de cada opção
- Y [US\$] de cada opção
- X+Y [US\$] de cada opção

4 - Análise de Prioridades com Atributos Múltiplos

Dados de Entrada:

- 1 - número de opções
- 2 - número de fatores j
- 3 - valores das prioridades de cada fator u_j para todas as opções
- 4 - valores das constantes de crescimento k_j

Cálculos Realizados pelo Programa

- 1 - Para cada opção multiplica os valores de u_j pela constante de crescimento k_j correspondente

- 2 - Calcula para cada opção $U_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot u_j$

Dados de Saída:

Listagem contendo para cada opção: - o número da opção

- valor de u_j para cada fator
- valor da constante de crescimento k_j para cada u_j
- valor de U_i

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - ICRP (1955) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Br. J. Radiol. Supplement 6. BIR.
- (2) - ICRP (1958) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford.
- (3) - ICRP (1959) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 2. Pergamon Press, Oxford.
- (4) - ICRP (1965) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford.
- (5) - IAEA (1967) Basic Safety Standards for Radiation Protection Safety Series n° 9. Printed by IAEA, Vienna.
- (6) - Normas Básicas de Proteção Radiológica - Resolução-CNEN-06/73, setembro 1973, CNEN, Rio de Janeiro.
- (7) - ICRP (1973) Implications of Commission Recommendations that Doses be kept as Low as Readily Achievable, ICRP Publication 22. Pergamon Press, Oxford.
- (8) - ICRP (1977) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26. Pergamon Press, Oxford.
- (9) - ICRP (1980) Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30. Pergamon Press, Oxford.
- (10) - IAEA (1982) Basic Safety Standards for Radiation Protection Safety Series n° 9, 1982 edition. Printed by IAEA, Vienna.
- (11) - Diretrizes Básicas de Radioproteção (Projeto de Norma Experimental) CNEN-NE-3.01, novembro 1988, CNEN, Rio de Janeiro.

(12) - Council Directive of 15 July 1980 Amending the Directives Laying Down the Basic Safety Standards for the Health Protection of the General Public and Workers Against the Dangers of Ionizing Radiation, Official Journal of the European Communities L246 of 17/09/1980. Directorate General Employment and Social Affairs, Luxembourg. EUR 7330

(13) - ICRP (1990) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford.

(14) - IAEA (1995) International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series n° 115-I. Printed by IAEA, Vienna.

(15) - ICRP (1977) Problems Involved in Developing an Index of Harm, ICRP Publication 27. Pergamon Press, Oxford.

(16) - ICRP (1984) Quantitative Bases for Developing a Unified Index of Harm, ICRP Publication 45. Pergamon Press, Oxford.

(17) - ICRP (1983) Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection, ICRP Publication 37. Pergamon Press, Oxford.

(18) - ICRP (1989) Optimization and Decision-Making in Radiological Protection, ICRP Publication 55. Pergamon Press, Oxford.

(19) - ICRP (1985) A Compilation of the Major Concepts and Quantities in use by ICRP. ICRP Publication 42. Pergamon Press, Oxford.

(20) - A.Sahyun, G.M.A.A.Sordi, D.L.Rodrigues, C.R.Romero Filho, F.L.Biazini Filho. Influence of Alpha Value in the Optimization Analysis for Transport Shielding of Fission Products. Anais do II Congresso Regional de Seguridad Radiologica y Nuclear, Zacatecas, México novembro de 1993. Memórias Volumen II - 3° parte, página 675.

(21) - P.J.Stokell, J.R.Croft, J.Lochard, J.Lombard. ALARA from Theory Towards Practice - Published by the Commission of the European Communities - Luxembourg, 1991. EUR 13796 EN.

- (22) - Croff, A. G. ORIGEN-2 Isotope Generation and Depletion Code-Matrix Exponential Method, February 1984. ORNL Documentation CCC-371
- (23) - Engel, R. L.; Greenborg, J; Hendrickson, N. M. BNWL-236 "ISOSHL D - A Computer Code for General Purpose Isotope Shielding Analysis", June 1966. ORNL Documentation CCC-079
- (24) - Sens, J.C Comunicação pessoal, Junho de 1994.
- (25) - ICRP (1982) General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 35. Pergamon Press, Oxford.
- (26) - IAEA (1980) Basic Requirements for Personnel Monitoring, Safety Series n°14, 1980 edition. Printed by IAEA, Vienna.
- (27) - IAEA (1987) Basic Principles for Occupational Radiation Monitoring, Safety Series n°84. Printed by IAEA, Vienna.
- (28) - NCRP (1977) Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report 51. Washington, D.C.