AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESTUDO DE NÍVEIS GENÉRICOS DE INTERVENÇÃO PARA PROTEÇÃO DO PÚBLICO EM UM ACIDENTE NUCLEAR OU EMERGÊNCIA RADIOLÓGICA

FÁBIO FUMIO SUZUKI

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

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

São Paulo
2003

84

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

ESTUDO DE NÍVEIS GENÉRICOS DE INTERVENÇÃO PARA PROTEÇÃO DO PÚBLICO EM UM ACIDENTE NUCLEAR OU EMERGÊNCIA RADIOLÓGICA

FÁBIO FUMIO SUZUKI

IPEN
LIVRO
22142
BIBLIOTECA

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

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

SÃO PAULO
2003

À memória de
Elizabeth Kinuyo Gimbo Vianna

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Gian-Maria A. A. Sordi, pela orientação, constante apoio, paciência e incentivo.

Ao Serviço de Radioproteção e à Diretoria de Segurança Radiológica do IPEN, pela oportunidade concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Linda Viola Ehlin Caldas, pelo estímulo e total apoio para realização deste trabalho.

Ao M.Sc. Demerval Leônidas Rodrigues, pelo incentivo, apoio e desenvolvimento do espírito crítico.

Aos companheiros do Serviço de Radioproteção, em especial às Doutoras Malvina Boni Mitake e Áurea Beatriz Cerqueira Geraldo, bem como aos Técnicos Antônio Alves de Andrade, Estanislau Borges Vianna e José Roberto Araújo Nicolau, pelo incentivo e suporte que possibilitaram a realização deste trabalho.

À M.Sc. Yasko Kodama, pelo incentivo, apoio, discussões e sugestões dadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas, Dr. Alberto Saburo Todo, Carlos Alberto Rodrigues da Costa, Christovam Romero Romero Filho, M.Sc. David Tadashi Fukumori, Eduardo Yoshio Toyoda, Francisco Mário Feijó Vasques, Dr. Goro Hiromoto, Matias Puga Sanches, M.Sc. Sandra Aparecida Bellintani, M.Sc. Teresinha de Moraes da Silva e M.Sc. Adélia Sahyun, por compartilharem seus conhecimentos, idéias e opiniões.

Aos professores da pós-graduação, especialmente aos professores Dr. José Roberto Rogero, Dra. Brigitte Roxana S. Pecequilo, Dra. Marina Fallone Koskinas e Dra. Selma Matheus Loureiro Guedes, pela dedicação em transmitir o conhecimento.

Às colegas Ana Maria C. P. Benassi, Ilze Cristina Puglia, Maria Cristina Ferreira dos Santos e Vera Lúcia Mariano Garcia pela competência e presteza nos serviços necessários para a execução deste trabalho.

Ao Organismo Internacional de Energia Atômica, pelo apoio financeiro para a participação em cursos e conferências.

À minha família, por tudo.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

ESTUDO DE NÍVEIS GENÉRICOS DE INTERVENÇÃO PARA PROTEÇÃO DO PÚBLICO EM UM ACIDENTE NUCLEAR OU EMERGÊNCIA RADIOLÓGICA

Fábio Fumio Suzuki

RESUMO

Após um acidente nuclear ou uma emergência radiológica, muitos fatores sociais e econômicos terão que ser levados em consideração nas ações de proteção do público e de recuperação do meio ambiente. A aplicação dos princípios de proteção radiológica para práticas em situações de intervenção pode levar à adoção de medidas de proteção desproporcionais ao risco envolvido, comprometendo os recursos disponíveis para ações mais efetivas. Isto causa um impacto negativo na população, podendo levar ao descrédito das medidas de proteção e perda de confiança nas autoridades. Neste contexto, os princípios de proteção radiológica para intervenções devem ser estudados e analisados para serem adequadamente aplicados nas situações de acidente ou emergência radiológica que envolvam o país. Esses princípios são constantemente aprimorados e o conceito de nível genérico de intervenção tem um papel importante na tomada de decisão para proteção do público. Os custos das medidas de proteção do público no Brasil foram pesquisados e a técnica de análise custo-benefício foi utilizada para estimar os níveis genéricos de intervenção para proteção do público aplicáveis no país. Os resultados foram comparados com aqueles internacionalmente recomendados, bem como com valores obtidos em estudo semelhante realizado para o Japão. Foi também efetuada uma análise de sensibilidade dos resultados com relação ao valor de α e uma pequena análise com relação ao custo das várias medidas de proteção.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-.

STUDY ON GENERIC INTERVENTION LEVELS FOR PROTECTING THE PUBLIC IN A NUCLEAR ACCIDENT OR RADIOLOGICAL EMERGENCY

Fábio Fumio Suzuki

ABSTRACT

After a nuclear accident or radiological emergency, several social and economical factors shall be considered for the actions to protect the public and to recover the environment. The application of the radiological protection principles on practices in intervention situations may lead to adoption of protective measures disproportional to the involved risk, compromising the resources available to more effective actions. This causes a negative impact on the population and may conduct to discredit about the protective measures and the lost of confidence on the authorities. In this context, the principles of radiological protection for interventions should be studied and analyzed for being adequately applied in accident situations or radiological emergencies that involves the country. These principles are constantly improved and the concept of generic intervention level plays an important role in the decision-making to protect the public. The costs involved to the protective measures for the public in Brazil were studied and cost-benefit analysis techniques were applied to estimate the generic intervention levels for public protection applicable in the country. These results were compared to those values internationally recommended, as well to values obtained in a similar study accomplished for Japan. It was also performed a sensibility analysis of the results regarding α value and a simple analysis of the results considering the costs of the several protective measures.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Efeitos da Radiação Ionizante 1
1.2. Práticas e Intervenção 3
1.3. Prevenção e Mitigação 4
1.4. Medidas de Proteção para o Público 6
1.4.1. Abrigo 6
1.4.2. Evacuação 6
1.4.3. Administração de iodo estável 7
1.4.4. Relocação temporária 8
1.4.5. Reassentamento 8
1.4.6. Restrição sobre alimentos 8
1.5. Níveis Genéricos de Intervenção 9
1.6. Histórico dos Níveis Genéricos de Intervenção 10
1.7. Finalidade e Objetivos 17
1.7.1. Finalidade 17
1.7.2. Objetivos 17
2. GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS 19
2.1. Dose Absorvida 19
2.2. Dose Equivalente 19
2.3. Dose Efetiva 21
2.4. Detrimento 23
2.5. Dose Coletiva 24
3. SITUAÇÕES DE EXPOSIÇÃO 26
3.1. Exposições Normais e Potenciais 26
3.2. Situações Normais 27
3.3. Situações de Acidente ou Emergência 29
3.4. Princípios Básicos para Intervenção 31
3.5. Aplicação dos Princípios para Intervenção 33
3.6. Categorização das Medidas de Proteção 35

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

4. DETERMINAÇÃO DE NÍVEIS GENÉRICOS DE INTERVENÇÃO 37
4.1. Teorias para Tomada de Decisão 38
4.2. Análise Custo-Benefício 40
4.3. Valor do Detrimento à Saúde (α) 42
4.3.1. Determinação da probabilidade do efeito 42
4.3.2. Determinação do custo do efeito 43
4.3.3. Determinação do valor de α 45
4.4. Níveis Genéricos de Intervenção Otimizados 45
4.5. O NGI para a Administração de lodo Estável 47
5. RESULTADOS 49
5.1. O Valor de α para o Brasil 49
5.2. Estimativa dos Custos do Abrigo 51
5.3. Estimativa dos Custos da Evacuação 52
5.4. Estimativa dos Custos da Relocação Temporária 54
5.5. Estimativa dos Custos do Reassentamento 56
5.6. Estimativa dos Níveis de Intervenção Otimizados 57
5.7. Estudo de Sensibilidade 58
5.7.1. Sensibilidade com relação ao valor de α 59
5.7.2. Sensibilidade com relação ao custo da medida de proteção 60
6. DISCUSSÃO 63
7. CONCLUSÕES 68
8. SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS 69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70

1. INTRODUÇÃO

1.1. Efeitos da Radiação Ionizante

Quando a radiação ionizante passa pela matéria sua energia é compartida com os átomos e moléculas, excitando-os ou formando íons. A ionização altera a configuração eletrônica dos átomos e essa alteração pode modificar a estrutura das moléculas que os contêm. A estrutura das moléculas também pode ser modificada pela excitação de seus átomos, caso a energia de excitação seja maior que a energia de ligação entre seus átomos.

Quando um tecido vivo é irradiado, as células que formam esse tecido podem ser danificadas de forma direta, caso as moléculas afetadas sejam as vitais para as funções da célula, como as moléculas de ácido desoxirribonucléico (ADN), ou de forma indireta, pela ação de radicais livres gerados na interação da radiação com moléculas não vitais, como as de H_2O.

A radiação ionizante pode produzir pequenas mudanças químicas na molécula de ADN, que são chamadas de mutações e não chegam a alterar a geometria cromossômica, mas também pode provocar alterações morfológicas importantes na estrutura da molécula de ADN, chamadas de aberrações cromossômicas. As células dispõem de mecanismos de reparo para esses tipos de dano, porém o tempo de reparo é muito maior que o tempo para o dano ser produzido. Por esse motivo, a probabilidade com que a radiação provoca efeitos na célula depende da concentração de íons em seu volume e a freqüência com que se geram no tempo.

Uma célula somática danificada pela radiação, que tenha sofrido mutações ou mesmo apresente aberrações cromossômicas, pode manter sua capacidade de reprodução e dar origem a um clone de células modificadas que, eventualmente, pode gerar um câncer. No caso de uma célula germinativa nas gônadas modificada pela radiação, pode haver a transmissão de informações

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

genéticas incorretas, o que pode provocar danos graves a alguns dos descendentes. Esses efeitos biológicos, que podem ter origem em uma única célula modificada pela radiação, são chamados de *efeitos estocásticos* pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR, isto é, são efeitos cuja origem é de natureza estatística (ICRP, 1977).

Por outro lado, uma célula irradiada também pode morrer ou ser impedida de se reproduzir, a chamada morte reprodutiva da célula. Vários órgãos ou tecidos não são afetados por pequenas reduções no número de células, mesmo porque o processo de perda e substituição de células é contínuo em muitos deles, porém, se a quantidade de células afetadas de um tecido ou órgão é suficientemente grande, haverá uma perda da função do órgão e o indivíduo exibirá condições patológicas clinicamente observáveis, tanto pela perda da função do órgão ou tecido, quanto pela reação do organismo na tentativa de reparar o dano. Esses efeitos tornam-se mais graves conforme o número de células afetadas aumenta e eram denominados de efeitos não-estocásticos pela CIPR. Posteriormente, considerando que a origem desses efeitos também carrega um componente probabilístico, por serem causados pela radiação, tiveram sua denominação alterada para *efeitos determinísticos*, isto é, efeitos com origem determinada na exposição à radiação (ICRP, 1991).

Neste contexto, a proteção radiológica é o conjunto de disciplinas cujo objetivo básico é promover um padrão de proteção adequado aos indivíduos, à sua progênie e à espécie humana como um todo, dos malefícios causados pela exposição à radiação ionizante, sem limitar indevidamente as práticas benéficas que advêm de sua utilização (ICRP, 1991).

A segurança do meio ambiente e de espécies não-humanas estaria garantida pelo padrão de controle ambiental exigido para a segurança da espécie humana, porém, há poucos estudos conclusivos para sustentar esta afirmação. A CIPR, desde 2000, designou um grupo de especialistas para analisar essa lacuna

de conhecimento e propor métodos para inserir a proteção ambiental aos princípios já consagrados da proteção radiológica [1].

Além dos efeitos diretamente deletérios à saúde, como os *efeitos estocásticos* e *determinísticos*, há outros tipos de efeitos prejudiciais relacionados à radiação ionizante, como a modificação indesejada do comportamento químico e físico de materiais ou a necessidade de restrição do uso de algumas áreas ou produtos. A CIRP introduziu o conceito de detrimento para identificar e, quando possível, quantificar todos esses efeitos deletérios. Por outro lado, coloca que é conveniente lidar separadamente com os efeitos diretamente deletérios à saúde, com o conceito de *detrimento* na saúde, e recomenda utilizar subsídios separados para as outras formas de detrimento (ICRP, 1977).

1.2. Práticas e Intervenção

A humanidade sempre esteve exposta às radiações ionizantes, tanto as de origem cósmica, quanto as provenientes de substâncias naturalmente radioativas, porém, há duas condições distintas em que pode haver a exposição de indivíduos à radiação ionizante e que devem ser consideradas em proteção radiológica (ICRP, 1984).

A primeira condição é aquela associada a atividades humanas que aumentam a exposição à radiação, seja por introduzir novas fontes de radiação, seja por modificar as vias de exposição existentes ou mesmo aumentando o número de indivíduos expostos. Os pontos em comum nesses cenários é que as exposições à radiação são previsíveis e podem ser limitadas por controles associados à fonte de radiação e pela aplicação de um sistema de limitação de dose e de risco. Essas atividades são denominadas *práticas* pela CIPR (ICRP, 1991).

---

[1] O grupo de especialistas produziu um relatório preliminar para a Comissão Principal da CIPR com o título "Protection of Non-Human Species from Ionising Radiation – Proposal for a framework for the assessment and management of the impact of ionising radiation in the environment", que foi colocado para consulta pública no endereço eletrônico da CIPR (http://www.icrp.org).

A segunda condição é aquela onde a fonte de radiação já está presente no cenário, porém não está sob controle do indivíduo. São situações como o caso de ocorrência de altas concentrações de radônio em residências, ou locais com resíduos de materiais radioativos de eventos anteriores, como as antigas instalações onde se trabalhava com Ra-226 e que, depois de destinadas a outros propósitos, descobriu-se que ainda havia contaminação radioativa nesses locais. Também se incluem nessa segunda condição de exposição as situações de acidente nuclear ou emergência radiológica. Neste contexto, o acidente nuclear é um evento ou situação inesperada ou não-intencional, em uma instalação nuclear, com possíveis conseqüências externas advindas de uma liberação incontrolada de materiais radioativos no meio ambiente. Já a emergência radiológica é definida pelo Organismo Internacional de Energia Atômica [2], OIEA, como o resultado de um acidente durante um transporte ou em uma instalação que não é parte do ciclo do combustível nuclear, mas que envolve grandes quantidades de materiais radioativos e que, em ambos os casos, podem resultar em riscos à saúde de membros do público (IAEA, 1985b).

Na segunda condição de exposição, onde não há o controle da fonte de radiação, o conjunto de medidas de proteção tomadas para restringir a exposição de membros do público e minimizar as conseqüências das exposições inevitáveis é denominado de *intervenção* pela CIPR (ICRP, 1977).

1.3. Prevenção e Mitigação

A proteção do público contra os riscos radiológicos associados a *práticas* deve ser obtida por controles aplicados à fonte de radiação, como contenção e blindagens adequadas, seleção criteriosa do projeto e do local para implantação da instalação, exigências de qualidade na construção, engenharia de segurança,

[2] Segundo Houaiss e Villar (2001), após a Segunda Guerra Mundial, por comodismo, tornou-se vulgar a utilização da palavra "agência" como tradução da palavra inglesa "agency". Por outro lado, Oliveira (2002) considera que, muitas vezes, esta não é a tradução apropriada para o português, sugerindo palavras como organização, órgão ou departamento. Neste trabalho adotamos a palavra "organismo", que é usada pelos países europeus de língua latina, inclusive Portugal, e que é definida por Houaiss e Villar (2001) como sinônimo de "organização" na acepção de entidade que serve à realização de ações de interesse social, político ou administrativo.

qualificação e competência da equipe de operação e manutenção e um programa de qualidade efetivo. Todos estes sistemas e procedimentos são para manter a fonte sob controle, reduzindo a probabilidade de seqüências de eventos que possam causar ou aumentar as exposições à radiação, isto é, atuando com a função de *prevenção* (ICRP, 1993). Essas medidas reduzem a probabilidade de um acidente e a magnitude potencial de suas conseqüências, porém não elimina a possibilidade de sua ocorrência.

Um segundo grau de proteção pode ser obtido com sistemas e procedimentos que, após o início de uma situação que pode levar à exposição do público, atuem para interromper a seqüência de eventos indesejada, ou limitar suas conseqüências, isto é, tenham a função de *mitigação* (ICRP, 1993).

Alguns sistemas e procedimentos se prestam para evitar ou limitar a exposição dos trabalhadores e as liberações de materiais radioativos para o ambiente e possuem caráter tanto de prevenção quanto de mitigação (ICRP, 1993). Outros, como o planejamento para situações de emergência com medidas de proteção para o público, têm a função de mitigação e, portanto, são medidas extremas tomadas quando a prevenção não é mais praticável.

Na ocorrência de um acidente nuclear ou emergência radiológica, apesar da possibilidade da fonte primária de radiação ser controlada em um curto espaço de tempo, os materiais radioativos já dispersos no ambiente representam fontes secundárias de radiação que podem levar muito tempo para serem removidas ou mesmo não serem passíveis de controle. Nesses casos, as medidas de proteção adotadas terão de ser aplicadas nos ambientes dos indivíduos, isto é, que atuem sobre as vias de exposição, como operações de descontaminação do solo ou a interdição do consumo de alguns tipos de alimentos. Também podem ser necessárias medidas de proteção que atuem diretamente sobre os membros do público, como solicitar que os mesmos permaneçam fechados em suas residências, ou mesmo providenciar sua retirada para outros locais.

1.4. Medidas de Proteção para o Público

Dentre as medidas de proteção, há algumas que são consideradas primárias, pois podem ser adotadas independentemente de outras medidas. Existem as medidas de proteção chamadas de secundárias, por exemplo, o controle de acesso às áreas de trabalho, que, apesar de aumentarem o grau de proteção, não podem ser adotadas independentemente das primárias. As principais medidas de proteção são apresentadas a seguir.

1.4.1. Abrigo

Refere-se à medida de proteção onde o público é orientado a permanecer dentro de edificações, em geral na própria casa, com os sistemas de ventilação desligados, as janelas e portas fechadas e, se possível, com as frestas vedadas. O objetivo do abrigo é reduzir a exposição, externa e interna, causada pela imersão na pluma radioativa. Não é recomendado que seja mantida por períodos maiores que dois dias.

A eficácia do abrigo depende da blindagem oferecida pela estrutura da edificação, bem como da capacidade de impedir a entrada do ar contaminado em seu interior. Em geral essa medida reduz as doses por inalação por um fator de dois e a dose causada pela irradiação externa da ordem de dez vezes (IAEA, 1994).

1.4.2. Evacuação

É a medida protetora que consiste em remover urgentemente o público de áreas especificadas por períodos de tempo da ordem de dias. Esta medida pode resultar em proteção completa contra a pluma radioativa se for tomada em tempo hábil, pois retira o público da área de risco e o leva para local onde não estará sujeito à imersão na pluma. Por outro lado, se for tomada de forma equivocada, pode levar a uma situação onde o público fica totalmente desprotegido, caso o

deslocamento do público se dê no momento da passagem da pluma. Também devem ser levados em conta outros fatores, como os riscos convencionais do deslocamento de um número grande de pessoas.

É possível decidir-se manter uma evacuação mesmo após o final da dispersão do material radioativo, para evitar uma exposição que possa ocorrer pela presença do material depositado no solo, porém não é recomendável que o tempo de evacuação seja maior que alguns dias (IAEA, 1994).

1.4.3. Administração de iodo estável

Em casos onde é esperada a presença de iodo radioativo entre os materiais liberados no acidente, a medida de administrar iodo estável para saturar a glândula tireóide pode reduzir a incorporação de iodo radioativo. Para se obter a máxima eficácia da medida, ela deve ser tomada antes de qualquer incorporação do iodo radioativo, ou logo que possível após a ocorrência do acidente. Esta não é uma medida tomada sozinha, mas acompanhada de outras medidas de proteção, como abrigo ou evacuação, porém, os estudos após o acidente de Chernobyl indicam que é uma medida substancialmente importante.

Quando o iodo estável é administrado oralmente cerca de seis horas antes da entrada de iodo radioativo no organismo, a proteção alcançada é quase completa. Se é administrado simultaneamente à inalação do iodo radioativo, a proteção é de cerca de 90 %. Se a administração do iodo estável é feita após a inalação, a eficácia decresce com o tempo decorrido e, após vinte e quatro horas, praticamente não tem mais efeito. A distribuição do iodo estável, portanto, é uma medida que deve ser prevista na fase de planejamento da resposta à emergência. A quantidade recomendada é de 130 mg de iodeto de potássio para adultos. A dose para crianças deve ser menor (IAEA, 1985b).

1.4.4. Relocação temporária

É a medida onde o público é retirado da área afetada pelo acidente por um período longo, porém limitado, da ordem de alguns meses. Essa medida visa evitar a exposição causada, principalmente, pelo material radioativo depositado no solo e pela inalação de material ressuspendido. Em geral, o público é alojado em casas temporárias ou alugadas.

Os riscos associados a uma relocação temporária são relativamente menores que os associados com uma evacuação, pois sua introdução pode ser realizada de uma maneira mais controlada, tranqüila e segura. Os riscos de se viver em acomodações temporárias também não são significativamente maiores que os daqueles encontrados na acomodação original, a não ser no caso de grupos especiais, como pacientes de um hospital, por exemplo.

1.4.5. Reassentamento

É a medida de proteção onde o público de uma determinada área é transferido para outra localidade, sem expectativa de retorno durante suas vidas. Esta é uma medida extrema, geralmente motivada pela contaminação do solo por radionuclídeos de meia-vida longa. Ela envolve a construção de novas acomodações, bem como de toda uma infra-estrutura em uma região distante das zonas contaminadas, por isso é uma medida de custo elevado.

1.4.6. Restrição sobre alimentos

Intervenção para controlar a contaminação de alimentos em geral não é considerada urgente, porém, deve ser tomada no tempo apropriado para não comprometer, inclusive, a eficácia de outras medidas de proteção. Controles para evitar a contaminação podem ser implementados em diferentes estádios na produção e distribuição de alimentos. Por exemplo, o uso de ração ou pastagem estocados, isto é, não contaminados, para limitar a incorporação de

radionuclídeos por animais de criação da cadeia alimentar humana pode ser bastante eficiente e pode ser aplicado em qualquer fase da emergência.

Nem sempre o alimento contaminado é desperdiçado. Se o contaminante for de meia-vida curta, o alimento pode ser armazenado para decaimento ou ser processado para aumentar seu tempo de prateleira, por exemplo, o leite pode ser processado para queijo.

Em geral, o controle de alimentos é restrito por legislações próprias para o assunto, ligadas a organismos públicos de saúde, que têm a função de proteger o público de alimentos inseguros, garantir a qualidade do alimento e prevenir fraudes (CAC, 2000).

1.5. Níveis Genéricos de Intervenção

A eficácia das medidas de proteção depende fortemente da oportunidade e da rapidez com que são tomadas, porém, quaisquer que sejam as medidas de proteção adotadas, todas trarão algum tipo de dano ou prejuízo para o público, seja na forma do custo para colocá-la em prática, ou na forma de acréscimo de riscos à saúde ou alguma ruptura social. A magnitude do dano ou prejuízo associado à medida de proteção dependerá de sua natureza e de circunstâncias específicas do cenário apresentado pelo acidente, como o tamanho da população envolvida ou as condições climáticas no local.

Há cenários onde pode não haver tempo suficiente para adotar uma medida protetora efetiva para uma área grande ou sobre uma população numerosa e, nesses casos, pode ocorrer que a adoção da medida provoque mais dano que benefício. A tomada de decisão para a introdução ou não de uma medida de proteção, portanto, deve estar baseada no balanço entre a redução da exposição que pode ser alcançada pela introdução da medida e o dano causado pela sua adoção.

Os custos e os benefícios considerados nesse balanço devem ser tanto os *tangíveis*, isto é, aqueles especificamente identificáveis e, pelo menos em teoria, sujeitos a uma quantificação em termos monetários ou em outra escala de valores, quanto os *intangíveis*, ou seja, aqueles que reconhecidamente contribuem para a satisfação dos desejos humanos, porém, não estão sujeitos a uma quantificação formal (ICRP, 1973).

Os estudos que analisam a relação entre a redução da exposição e os custos tangíveis inerentes a uma dada medida de proteção para o público podem dar origem a um *nível genérico de intervenção*, NGI, associado a essa medida, abaixo do qual sua introdução, sob o ponto de vista de proteção radiológica, não seria justificada, pois os custos para sua adoção não compensariam os custos associados ao dano radiológico evitado.

1.6. Histórico dos Níveis Genéricos de Intervenção

Três acidentes tiveram impactos significativos no desenvolvimento de critérios para a prevenção e preparo de resposta a acidentes nucleares e emergências radiológicas, inclusive sobre os *níveis de intervenção* para proteção do público. O primeiro foi o incêndio, em 1957, no reator n° 1 de produção de plutônio em Windscale, no Reino Unido, quando cerca de 2,7 x 10^{15} Bq de materiais radioativos foram liberados ao ambiente (Martiniussen, 2001). Antes desse evento existiam somente alguns valores de referência para relacionar os resultados de monitoramentos ambientais com as possíveis doses sobre a população, mas sem uma preocupação direta com a proteção do público. Foi após o acidente que começaram a tomar forma os estudos para se estabelecer critérios pré-determinados para se introduzir medidas de proteção para o público.

Em 1975, o Conselho de Pesquisas Médicas da Grã-Bretanha publicou valores de dose de referência para serem aplicados em situações de emergência, tanto para órgãos e tecidos específicos, quanto para o corpo inteiro, bem como orientações para determinar os valores de contaminação em leite, ar e pastagens que levariam àquelas doses (Emmerson, 1988). O conceito de *nível de*

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

intervenção passou, então, a ser adotado e desenvolvido por vários países e organizações internacionais. Inicialmente, esse conceito de *nível de intervenção* era o de se ter um único valor de dose projetada, para cada medida de proteção, a partir do qual era considerada a introdução daquela medida.

O segundo acidente a influenciar significativamente o desenvolvimento do conceito de *níveis de intervenção* foi a fusão parcial do núcleo, em 1979, do reator n° 2 da planta nuclear de potência de Three Mile Island, nos Estados Unidos da América, quando a contaminação do solo não foi tão significativa quanto em Windscale, pois grande parte do material radioativo liberado para o ambiente foi o gás nobre criptônio, cerca de 1,6 x 10^{15} Bq (NRC, 2002), porém resultou em uma grande preocupação com relação a liberação de grandes quantidades de material radioativo no meio ambiente. Nos anos seguintes, uma revisão das bases para intervenções culminou com a publicação, pela CIPR, de um documento com os novos princípios para a proteção do público em caso de acidentes graves (ICRP, 1984). Nesse período, o conceito de um valor único para cada *nível de intervenção* abriu espaço para uma idéia mais flexível, onde haveria um intervalo de valores de dose para cada medida de proteção. O valor inferior desse intervalo seria tal que, quando as doses projetadas fossem maiores que ele, deveria ser considerada a medida de proteção respectiva. Abaixo daquele valor, os riscos associados à introdução da medida seriam maiores que os associados à dose de radiação. O valor superior do intervalo, também de dose individual projetada, indicaria quando a medida de proteção associada quase certamente deveria ser implementada. O OIEA (IAEA, 1985b), baseado nos princípios publicados pela CIPR, recomendou intervalos de valores para medidas de proteção (TAB. 1.1).

O terceiro acidente a ter grande impacto sobre os critérios de intervenção foi o acidente nuclear envolvendo o reator n° 4 da planta nuclear de potência de Chernobyl, na República da Ucrânia, em 1986, quando cerca de 1 x 10^{19} Bq de produtos de fissão e ativação foram lançados ao ambiente. A dispersão desse material alcançou proporções mundiais (Métivier, 2002) e as diferenças entre os *níveis de intervenção* em que as medidas de proteção foram adotadas pelos diferentes países, e mesmo as diferenças entre certas regiões dentro de um país, criaram um clima de insegurança nas populações envolvidas causado, em parte,

pela perda de confiança na adequação das medidas tomadas pelas autoridades. Esse fato, entre outros fatores, levou as organizações internacionais a rever as orientações na aplicação dos *níveis de intervenção*, bem como os critérios para sua determinação numérica (Emmerson, 1988).

Tabela 1.1. Níveis genéricos de intervenção, para medidas de proteção urgentes, recomendados pelo OIEA em 1985 (IAEA, 1985b).

Medida de proteção	Nível genérico de intervenção [a]	
	Corpo inteiro	Pulmão [b], tireóide e qualquer outro órgão preferencialmente irradiado
Abrigo	5 - 50 mSv [c]	50 - 500 mSv
Evacuação	50 - 500 mSv [c]	500 - 5000 mSv
Administração de iodo estável	-	50 – 500 mSv [d]
Relocação temporária	50 - 500 mSv [e]	Não antecipado
Controle de alimentos e água	5 - 50 mSv [c]	50 - 500 mSv

[a] Dose equivalente individual projetada. O valor inferior do intervalo indica a partir de quando a medida de proteção respectiva deve ser considerada. O valor superior do intervalo indica quando a medida de proteção associada quase certamente deve ser implementada. Em todos os casos, os valores referem-se à média de amostras apropriadas da população, não a dos indivíduos mais expostos.

[b] Para doses elevadas de radiação alfa no pulmão, o valor numérico se aplica ao resultado do produto entre a dose absorvida, em miligrays, e a eficácia biológica relativa, adotada como 10 (EBR = 10).

[c] Ou dose equivalente efetiva.

[d] Apenas para tireóide.

[e] Dose equivalente comprometida individual projetada para o primeiro ano.

Os critérios de intervenção aceitos a partir daquele evento estabelecem que as medidas para proteção da população devem estar baseadas no equilíbrio do detrimento inerente àquela medida e a redução de exposição que pode ser alcançada por ela. A CIPR (ICRP *apud* Hedemann-Jensen, 1994), então, recomenda valores de *níveis de intervenção* baseados em doses evitadas pela introdução das medidas de proteção (TAB. 1.2).

A experiência de Chernobyl fez com que o OIEA retomasse o conceito de um único valor para cada *nível de intervenção*, a fim de aumentar a confiança pública nas autoridades responsáveis pelas tomadas de decisão nos casos de

acidente. Também salientou a necessidade de um consenso internacional sobre os valores para os NGI. Um grupo de especialistas desenvolveu propostas neste sentido e foi publicado pelo OIEA, em 1993, um documento técnico para ser comentado e dar origem a novas recomendações para os critérios de intervenção. Nesse documento (IAEA, 1993) já são propostos valores únicos para os NGI (TAB. 1.3).

Tabela 1.2. Níveis genéricos de intervenção, para medidas de proteção urgentes, recomendados pela CIPR em 1993 (ICRP *apud* Hedemann-Jensen, 1994).

Medida de proteção	Nível genérico de intervenção [a]	
	Quase sempre justificado	Intervalo de valores otimizados [b]
Abrigo (menos de 1 dia)	50 mSv	5 - 50 mSv
Evacuação (menos que 1 semana)	500 mSv 5000 mSv [c]	50 - 500 mSv 500 - 5000 mSv [c]
Administração de iodo estável	500 mSv [d]	50 – 500 mSv [d]
Relocação temporária	1000 mSv	5 – 15 mSv/mês
Restrição para cada alimento	10 mSv [e] (em 1 ano)	1 – 10 $kBq.kg^{-1}$ 10 – 100 $Bq.kg^{-1}$

[a] Doses efetivas evitáveis, isto é, a ação deve ser tomada se esse valor de dose puder ser evitado por ela. Em todos os casos, os valores referem-se à média de amostras apropriadas da população, não a dos indivíduos mais expostos. Entretanto, a dose projetada para os grupos de indivíduos mais expostos deve ser mantida abaixo dos limiares para efeitos determinísticos.

[b] O valor superior da faixa indica a partir de quando a medida de proteção quase sempre estaria justificada. Adicionalmente a CIRP indica que os valores de níveis de intervenção otimizados, obtidos na prática para situações específicas do acidente e do local, não estariam mais que um fator de 10 abaixo daquele valor superior da faixa.

[c] Doses equivalentes evitáveis na pele.

[d] Doses equivalentes evitáveis na tireóide.

[e] Doses efetivas comprometidas evitáveis em um ano.

Baseado nos vários comentários recebidos sobre o documento técnico de 1993, o OIEA recomendou valores únicos de NGI dados em termos de dose evitada pelas respectivas medidas de proteção, mostrados na TAB. 1.4 (IAEA, 1994). O vínculo de que devem ser realizados todos os esforços para evitar os

efeitos determinísticos graves permaneceu e, então, o OIEA incluiu em sua publicação (IAEA, 1994) os valores numéricos dos limiares para esses efeitos (TAB. 1.5), para servirem de guia na tomada de decisão para introduzir medidas de proteção, pois o que se deseja é evitá-los.

Tabela 1.3. Níveis genéricos de intervenção propostos pelo OIEA em 1993 (IAEA, 1993).

Medida de proteção	Nível genérico de intervenção [a]
Abrigo	3 mSv em 6 horas
Evacuação	10 mSv em 1 dia
Administração de iodo estável	50 mGy em 10 dias (crianças) [b] 500 mGy em 10 dias (adultos) [b]
Relocação temporária	30 mSv no primeiro mês [c] 10 mSv em um mês subseqüente [c]
Reassentamento	1 Sv no tempo de vida [d]

[a] Doses evitáveis, isto é, a ação deve ser tomada se esse valor de dose puder ser evitado por ela. Em todos os casos, os valores referem-se à média de amostras apropriadas da população, não a dos indivíduos mais expostos. Entretanto, a dose projetada para os grupos de indivíduos mais expostos deve ser mantida abaixo dos limiares para efeitos determinísticos.

[b] Dose comprometida evitável na tireóide.

[c] O mês aqui refere-se a período de 30 dias e não ao mês de calendário.

[d] Normalmente o tempo de vida é tomado como 70 anos para público, mas as doses devem ser avaliadas para a média da população afetada.

O OIEA incorporou os valores apresentados nas TAB. 1.4 e 1.5 na publicação das normas básicas internacionais de segurança para proteção contra a radiação ionizante e para a segurança das fontes de radiação (IAEA, 1997). Esses mesmos valores também são adotados na publicação do OIEA sobre prevenção e resposta a emergências nucleares e radiológicas (IAEA, 2002).

Além dos três acidentes nucleares que acabaram influenciando no desenvolvimento dos critérios para intervenção, cabe citar a emergência radiológica ocorrida em Goiânia, em 1987, quando 4,4 x 10^{13} Bq de Cs-137 dispersaram-se no ambiente (IAEA, 1988). Até aquele evento, acreditava-se que os níveis de intervenção seriam aplicáveis principalmente para acidentes do ciclo do combustível nuclear, porém, a experiência de Goiânia demonstrou que fontes

de instalações radiativas também podem ser envolvidas em acidentes com contaminação de grandes áreas.

Tabela 1.4. Níveis genéricos de intervenção recomendados pelo OIEA em 1994 (IAEA, 1994).

Medida de proteção	Nível genérico de intervenção [a]
Abrigo	10 mSv [b]
Evacuação	50 mSv [c]
Administração de iodo estável	100 mGy [d]
Relocação temporária	30 mSv (no primeiro mês) [e] 10 mSv (em um mês subseqüente) [e]
Reassentamento	1 Sv (no tempo de vida) [f]

[a] Estes valores são de doses evitáveis, isto é, a ação deve ser tomada se esse valor de dose puder ser evitado. Em todos os casos, os valores referem-se à média de amostras apropriadas da população, não a dos indivíduos mais expostos. Entretanto, a dose projetada para os grupos de indivíduos mais expostos deve ser mantida abaixo dos limiares para efeitos determinísticos.

[b] Abrigo não é recomendado por mais de 2 dias. Autoridades podem desejar recomendar abrigo em níveis de intervenção inferiores, por menores períodos de tempo, para facilitar medidas de proteção posteriores, como evacuação por exemplo.

[c] Evacuação não é recomendada para períodos maiores que uma semana. Autoridades podem iniciar a evacuação em níveis de intervenção menores, por períodos mais curtos ou quando a evacuação pode ser aplicada rápida e facilmente, como em pequenos grupos de pessoas por exemplo. Valores maiores podem ser apropriados quando a evacuação pode ser difícil, como em grandes populações ou com transporte inadequado.

[d] Dose evitável na tireóide. É recomendado somente um nível de intervenção para todos os grupos de idade por razões práticas.

[e] O mês aqui refere-se a período de 30 dias e não ao mês de calendário.

[f] Normalmente o tempo de vida do público é tomado como 70 anos, mas as doses devem ser avaliadas para a média da população afetada.

Apesar dos valores recomendados para os NGI representarem um entendimento internacional, tanto a CIPR quanto o OIEA deixam claro que eles servem como referência para assegurar que o público não estará sujeito a riscos indevidos se forem tomadas as medidas de proteção adequadas. Os processos de otimização considerando aspectos específicos do local, ou mesmo fatores variáveis de cada situação de acidente, podem levar a se obter *níveis de intervenção* muito maiores ou menores que os recomendados pela CIPR ou pelo OIEA.

O OIEA recomenda que se leve em consideração os fatores próprios de cada situação, e as particularidades de cada cenário nacional ou local, para o estudo de *níveis genéricos de intervenção*, aplicando-se os princípios de proteção ao público (IAEA, 1994).

Tabela 1.5. Limiares para ocorrência de efeitos determinísticos e as probabilidades de risco de efeitos estocásticos, para as exposições agudas correspondentes (IAEA, 1994).

Órgão ou tecido	Dose [a] em menos de 2 dias (Gy)	Efeitos determinísticos		Probabilidade de Risco [b] de efeito estocástico
		Tipo de efeito	Ocorrência	
Corpo inteiro [c]	1	Morte	1 - 2 meses	1×10^{-1} (câncer fatal) [d]
Pulmões	6	Morte	2 - 12 meses	5×10^{-2} (câncer de pulmão) [b]
Pele	3	Eritema	1 - 3 semanas	1×10^{-3} (câncer de pele) [e]
Tireóide	5	Hipotireoidismo	Um a vários anos	8×10^{-3} (câncer fatal) [f]
Cristalino [g]	2	Catarata	6 meses a vários anos	Não aplicável [g]
Gônadas [g]	3	Esterilidade permanente	Semanas	3×10^{-2} (efeitos genéticos)
Feto	0,1	Teratogênese	-	Não aplicável

[a] Dose absorvida projetada recebida em um curto período de tempo. Aplicável à população caracterizada por distribuição de idade típica e representando doses abaixo daquelas em que os efeitos determinísticos normalmente não ocorrerão. Estes valores podem não ser apropriados para grupos radiossensíveis.

[b] Risco de efeito estocástico médio a indivíduos que são expostos a doses dos valores dos limiares da segunda coluna, mas que não exibem efeitos determinísticos. Exceto o pulmão, os demais não levam em consideração o fator de eficácia da dose e da taxa de dose (FEDTD), pois a dose é recebida em um curto espaço de tempo (dose absorvida maior que 0,2 Gy ou taxa de dose maior que 0,1 Gy/h).

[c] Pode ocorrer vômito em indivíduos radiossensíveis no primeiro dia após a exposição para doses acima de 0,5 Gy.

[d] Inclui uma probabilidade de risco de 1×10^{-2} para leucemia.

[e] Expressa somente a probabilidade de risco de câncer fatal de pele, que representa somente uma pequena fração do total de cânceres de pele.

[f] A maioria dos cânceres de tireóide é curável, então está representada apenas a probabilidade do risco de câncer fatal de tireóide. O valor deveria ser multiplicado por cerca de 20 para a probabilidade do risco total de câncer de tireóide.

[g] Na prática, a consideração em separado do cristalino e nas gônadas é freqüentemente desnecessária, normalmente esses órgãos são protegidos automaticamente contra efeitos determinísticos pelo valor do limiar de outros órgãos, como a medula óssea. Isto significa que o risco de efeitos genéticos apresentado está sobreestimado por um fator 3 se o critério limitante aplicado fosse 1 Gy de dose de corpo inteiro.

1.7. Finalidade e Objetivos

1.7.1. Finalidade

Os *níveis genéricos de intervenção* para proteção do público, recomendados internacionalmente, são obtidos com base em avaliações de recursos tipicamente alocados por países muito desenvolvidos para evitar o detrimento associado à exposição à radiação ionizante. Para os países ditos "em desenvolvimento", como o Brasil, fatores econômicos e sociais podem fazer com que os recursos alocados para esse fim sejam significativamente diferentes daqueles. A proposta deste trabalho é realizar um estudo dos princípios que norteiam a proteção do público em casos de acidente nuclear ou emergência radiológica e determinar os *níveis genéricos de intervenção* associados à abrigo, evacuação, relocação temporária e reassentamento, de forma que reflitam a situação real do País.

1.7.2. Objetivos

Para se alcançar a finalidade proposta para este trabalho, vários objetivos tiveram que ser planejados e executados passo a passo. Os principais foram:

- Mostrar a necessidade da determinação de *níveis genéricos de intervenção* para a proteção do público. Para tanto, efetuou-se um levantamento histórico-cronológico dos *níveis genéricos de intervenção* e quais eram suas bases de sustentação.

- Efetuar um estudo das situações de exposição, distinguindo as exposições normais daquelas potenciais.

- Efetuar uma discussão das situações de acidente ou de emergência, fornecendo os princípios básicos para a intervenção.

- Discutir as principais medidas de proteção que podem ser aplicadas ao público durante a intervenção.

- Efetuar um estudo de como determinar os *níveis genéricos de intervenção* e, para tanto, discutiu-se o valor de α relativo ao detrimento à saúde, estabelecendo equações que possibilitam a determinação desses valores.

- Determinar o valor de α real para o nosso país.

- Estimar os custos de proteção para o abrigo, para a evacuação, para a relocação temporária e para o reassentamento.

- Estimar os *níveis de intervenção* otimizados para o nosso país, fazendo uso da técnica de análise custo-benefício para tomada de decisão.

- Efetuar um estudo de sensibilidade dos resultados em função da variação do valor de α, e um pequeno estudo para os demais fatores que foram utilizados na análise custo-benefício.

- Fornecer sugestões para futuros trabalhos que visam aprimorar os resultados e completar as lacunas deixadas por este.

2. GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS

2.1. Dose Absorvida

A dose absorvida, *D*, que é definida como a energia absorvida por unidade de massa de matéria exposta, é a grandeza dosimétrica fundamental da proteção radiológica (ICRP, 1991). Apesar da dose absorvida poder ser especificada ponto a ponto, é a *dose absorvida média* em um tecido ou órgão, D_T, que pode ser utilizada como um indicador da probabilidade de efeitos estocásticos, caso considere-se a relação dose-resposta como linear. A linearidade é uma aproximação razoável para a relação dose-resposta em um pequeno intervalo nas doses pequenas. Já no intervalo de valores onde ocorrem os efeitos determinísticos, a relação dose-resposta não é linear (ICRP, 1991).

2.2. Dose Equivalente

A probabilidade de ocorrência dos efeitos estocásticos não depende somente da dose absorvida, mas também do tipo de radiação a que se foi exposto e de sua energia inerente. Para obter uma grandeza dosimétrica que refletisse essas características, a CIPR ponderou a dose absorvida num ponto, *D*, aplicando um fator de qualidade, *Q*, e chegou a uma grandeza denominada como equivalente dose [3], *H* (ICRP, 1966).

Em 1990, a CIPR introduziu um novo conceito para considerar os diferentes tipos de radiação, o fator de ponderação de radiação, w_R, e chegou a uma grandeza que mais facilmente pode representar uma dose no tecido ou órgão. Por esse motivo essa grandeza dosimétrica foi denominada *dose*

[3] Apesar do nome oficial dessa grandeza ser "equivalente de dose" (CONMETRO, 1988), consideramos que esta é uma tradução imperfeita para o conceito que a CIPR dá para a grandeza. Sugere-se neste trabalho o termo "equivalente dose", por analogia a outros termos técnicos como "equivalente eletroquímico" e "equivalente espacial".

equivalente no tecido ou órgão, H_T. O valor da *dose equivalente*, é obtido pela equação 2.1 (ICRP, 1991).

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} \tag{2.1}$$

Onde:

$D_{T,R}$ é a *dose absorvida média* em um tecido ou órgão, T, causada por cada tipo de radiação R;

w_R é o fator de ponderação de radiação definido para cada tipo e energia de radiação incidente (TAB. 2.1).

Tabela 2.1. Fatores de ponderação de radiação, recomendados pela CIPR em 1990 (ICRP, 1991).

Tipo e intervalo de energia	w_R [a]
Fótons de todas as energias	1
Elétrons [b] e múons de todas as energias	1
Nêutrons, energias:	
< 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 Mev	10
> 20 MeV	5
Prótons, não de recuo, energias > 2 MeV	5
Partículas α, fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

[a] Todos os valores referem-se à radiação incidente sobre o corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

[b] Exceto os elétrons auger emitidos pelos núcleos ligados ao ADN.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

Os fatores de ponderação de radiação foram selecionados de forma a representarem os valores da eficácia biológica relativa, EBR [4], na indução de efeitos estocásticos em pequenas doses (ICRP, 1991). A EBR de um tipo de radiação, comparada a outro tipo, é a razão inversa das doses absorvidas que produzem o mesmo efeito biológico.

2.3. Dose Efetiva

A relação entre a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos e a dose equivalente varia entre diferentes tecidos ou órgãos, por causa das radiossensibilidades distintas que cada um apresenta. A CIRP definiu uma outra grandeza física, derivada da dose equivalente, de forma que apresenta uma completa correlação com todas as probabilidades de efeitos estocásticos. Para isso introduziu o fator de ponderação do tecido, w_T, que representa a contribuição relativa do órgão ou tecido T ao detrimento total causado pela irradiação uniforme de corpo inteiro. Na TAB. 2.2 são mostrados os valores recomendados de w_T (ICRP, 1991).

Anteriormente, a CIPR denominava essa nova grandeza como dose equivalente efetiva, porém, para simplificação, atualmente é denominada de *dose efetiva*, *E*. A equação 2.2 mostra como determinar o valor da *dose efetiva*.

$$E = \sum_T w_T \times H_T \tag{2.2}$$

Onde:

H_T é a *dose equivalente* no órgão ou tecido T;

w_T é o fator de ponderação para o órgão ou tecido T (TAB. 2.2).

Por causa dos riscos à saúde humana que podem advir da confusão entre as grandezas dosimétricas acima citadas, apesar da unidade dessas grandezas,

[4] Para uma discussão mais aprofundada sobre o desenvolvimento histórico da EBR e dos fatores Q e w_R, sugere-se a leitura do relatório preliminar do Grupo de Trabalho 37 da CIPR, denominado "Relative Biological Effectiveness (RBE), Radiation Weighting Factor (w_R), and Quality Factor (Q)", de dezembro de 2002, disponível no endereço eletrônico da CIPR (http://www.icrp.org).

no Sistema Internacional de Unidades, ser o joule por quilograma, por sugestão da Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação, CIUR, a Junta Internacional de Pesos e Medidas, JIPM, adotou nomes especiais diferenciados para as unidades dessas grandezas (BIPM, 1998). A unidade de dose absorvida recebeu o nome gray, Gy, e as unidades de equivalente dose, dose equivalente e dose efetiva receberam o nome sievert, Sv.

Tabela 2.2. Fatores de ponderação dos tecidos, recomendados pela CIPR em 1990 (ICRP, 1991).

Tecido ou órgão	w_T [a]
Gônadas	0,20
Medula óssea (eritropoética)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Superfície do osso	0,01
Restante [b]	0,05 [c]

[a] Todos os valores foram desenvolvidos a partir de uma população referência de números iguais de ambos os sexos e uma ampla faixa de idade. Se aplicam aos trabalhadores e a toda população de ambos os sexos.

[b] Para propósito de cálculo, o restante do corpo é composto por supra-renais, cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rim, músculo, pâncreas, baço, timo e útero. A lista inclui órgãos que têm probabilidade de serem irradiados seletivamente. Sabe-se que alguns órgãos da lista são suscetíveis à indução de câncer.

[c] Para casos excepcionais, em que um único tecido ou órgão dentre os restantes recebe uma dose equivalente superior à dose mais alta em qualquer dos doze órgãos para os quais é definido um w_T, deve ser aplicado um fator de ponderação de 0,025 ao tecido ou órgão em apreço, e um fator de ponderação de 0,025 para a dose média nos outros tecidos ou órgãos restantes.

A correlação mais simples entre um incremento na dose equivalente e o incremento conseqüente na probabilidade de um determinado efeito estocástico ocorrer é o de uma relação linear que passa pela origem. Dados epidemiológicos

humanos não são suficientemente precisos para confirmar ou excluir esta hipótese (ICRP, 1991).

Estudos *in vitro* e em animais indicam que em doses e taxas de doses pequenas é improvável que mais de um evento ionizante ocorra nas partes críticas de uma célula em um intervalo de tempo que os mecanismos de reparo não possam atuar. Nessas situações a relação dose-resposta será linear. Com doses e taxas de dose mais elevadas, dois ou mais efeitos podem se combinar, intensificando o efeito, que será refletido na relação dose-resposta como um termo quadrático. Com doses ainda maiores, a morte das células torna-se importante, provocando uma diminuição da inclinação da relação (ICRP, 1991).

A CIPR considera que há evidências suficientes para justificar a aceitação da não-linearidade quando se interpreta dados com doses e taxas de dose elevadas de radiações como gama e X, de transferência linear de energia, TLE, pequena. Quando os coeficientes de probabilidade são obtidos diretamente de observações feitas com doses e taxas de dose elevadas, a comissão decidiu reduzir esses coeficientes de um fator de 2 (ICRP, 1991). Esse fator de redução foi denominado de Fator de Eficácia de Dose e Taxa de Dose, FEDTD, e é incluído nos coeficientes de probabilidade para todas as doses equivalentes resultantes de doses absorvidas inferiores a 0,2 Gy, e das demais doses absorvidas, quando a taxa de dose for menor que 0,1 $Gy.h^{-1}$ (ICRP, 1991).

2.4. Detrimento

Então a CIPR definiu o *detrimento* na saúde de uma população como a esperança matemática do dano à saúde causado por uma exposição à radiação, levando em conta não somente a probabilidade de cada efeito deletério, mas também a sua gravidade (ICRP, 1977). Nestes termos, em um subconjunto exposto *j* da população, se é pequena a probabilidade de se sofrer um dado efeito deletério *i*, causado por uma exposição à radiação, o *detrimento*, G_j nesse subconjunto, é dado pela equação 2.3:

$$G_j = N_j \sum_i p_i \times g_i \tag{2.3}$$

Onde:

N_j é o número de pessoas do subconjunto exposto j;

p_i é a probabilidade de sofrer o efeito i;

g_i é o fator de ponderação da gravidade do efeito i.

A CIPR considera o fator de ponderação da gravidade igual a 1 para a morte de indivíduos e para efeitos hereditários graves em seus descendentes. Para os efeitos menos graves, fatores de ponderação menores são implícitos, porém não são especificados pela CIPR (ICRP, 1977).

2.5. Dose Coletiva

A relação entre o *detrimento* e a distribuição de *dose efetiva* em uma população exposta não é simples, porém, em muitas situações, a quantidade chamada de *dose efetiva coletiva*, S, pode ser utilizada para expressar essa relação (ICRP, 1977). A *dose efetiva coletiva*, que também é freqüentemente chamada simplesmente de *dose coletiva*, pode ser definida como:

$$S = \sum_j N_j \times \bar{E}_j \tag{2.4}$$

Onde:

$\bar{E}_j$ é a dose efetiva média *per capita*;

N_j é o número de membros do subgrupo exposto j da população.

Resulta que a unidade da dose coletiva é o sievert.pessoa (Sv.pes).

Resta então determinar a correlação que existe entre as grandezas dose coletiva e detrimento. Partindo da definição de *detrimento* dada pela equação 2.3.

e, em função da linearidade da função dose-resposta, podemos escrever que a probabilidade de sofrer o efeito *i* pode ser determinada por:

$$p_i = r_i \times \bar{E}_j \tag{2.5}$$

Onde:

$\bar{E}_j$ é a dose efetiva média *per capita* recebida pelo subgrupo exposto j da população;

r_i é o coeficiente de probabilidade de sofrer o efeito *i*.

Substituindo a relação 2.5 em 2.3, temos que:

$$G_j = N_j \sum_i r_i \times \bar{E}_j \times g_i \text{, ou seja:}$$

$$G_j = N_j \times \bar{E}_j \sum_i r_i \times g_i \tag{2.6}$$

Somando-se o detrimento em todos os subgrupos *j* da população, e substituindo-se a relação 2.4 em 2.6, obtemos:

$$G = S \sum_i r_i \times g_i \tag{2.7}$$

Concluindo, determinando-se a dose coletiva e conhecendo o coeficiente de probabilidade de sofrer-se o efeito *i* e o fator de ponderação da gravidade deste efeito, conhecemos o detrimento causado na população.

3. SITUAÇÕES DE EXPOSIÇÃO

3.1. Exposições Normais e Potenciais

As exposições que podem advir da introdução de uma *prática* podem ser categorizadas em dois grandes grupos, as exposições normais e as potenciais (ICRP, 1991).

As exposições normais são as que racionalmente são esperadas que ocorram com a introdução da prática, isto é, são aquelas certas que vão ocorrer ou podem ser previstas, independentemente do tempo em que ela ocorra, com uma probabilidade próxima de 1. Estão incluídas entre as exposições chamadas normais, tanto as exposições ocorridas durante as operações conduzidas como planejadas, quanto aquelas que ocorrem em eventos não planejados, que têm grande probabilidade de ocorrer, maior ou igual a 10^{-2} por ano, mas que as doses previstas para esses eventos estão dentro dos limites de dose prescritos para as práticas (ICRP, 1991; 1993). Para evitar ou minimizar as exposições normais são tomadas medidas de proteção.

A exposição potencial é aquela que pode advir da introdução de uma prática, à qual pode ser atribuída uma probabilidade de ocorrência, mas que não há certeza de que irá acontecer. A exposição potencial está associada a doses previstas acima dos limites prescritos para exposições normais, isto é, a exposição potencial é de pequena probabilidade de ocorrência, menor que 10^{-2} por ano, porém, caso ela ocorra, as doses envolvidas podem ser elevadas (ICRP, 1993). Para evitar ou minimizar as exposições potenciais são tomadas medidas de segurança.

3.2. Situações Normais

Em condições normais, as doses advindas de *práticas*, tanto as laborais quanto as do público, são mantidas dentro de valores específicos. Tipicamente esses valores de dose são muito pequenos, comparáveis às variações locais da radiação natural de fundo. Normalmente esses valores são conseguidos por meio de controles sobre a fonte de radiação e não requerem ações diretas sobre o meio ambiente ou o público em geral. Esse modo de se conduzir uma *prática* segue os princípios gerais de proteção radiológica válidos para situações onde a fonte de radiação está sob controle. Os princípios básicos de proteção radiológica aplicados às *práticas* são três (ICRP, 1991):

a) O *princípio da justificação da prática*: estabelece que nenhuma atividade envolvendo exposição à radiação deve ser adotada a menos que traga aos indivíduos ou à sociedade benefícios suficientes para compensar o detrimento por ela provocado.

b) O *princípio da otimização da prática*: estabelece que, uma vez que uma prática tenha sido justificada e adotada, todas as doses relacionadas àquela prática devem ser mantidas tão pequenas quanto racionalmente exeqüíveis, levando em conta fatores sociais e econômicos.

c) O *princípio da limitação da dose individual e do risco*: para prevenir casos em que a situação otimizada seja aquela em que poucos indivíduos recebam doses inapropriadamente elevadas, ou casos onde o mesmo indivíduo está sujeito a exposições causadas por várias fontes independentes, são estabelecidos limites de dose e de risco que não devem ser ultrapassados e servem de vínculos para o processo de otimização.

Os valores dos limites de dose individuais internacionalmente aceitos atualmente para as *práticas* são sumarizados na TAB. 3.1 (ICRP, 1991; IAEA, 1997). Os limites para os trabalhadores são estabelecidos de forma que os riscos radiológicos associados a eles são da ordem daqueles encontrados em situações

normais da indústria convencional com bons padrões de segurança. No caso dos limites para indivíduos do público, os riscos radiológicos associados são menores ou iguais àqueles aceitos na vida diária, e cerca de uma ordem de magnitude menor do que aqueles dos trabalhadores (ICRP, 1977).

Tabela 3.1. Limites de dose individual aplicado às *práticas.*

Limites de Dose Individuais Anuais [a]		
	Trabalhadores	Público
Dose efetiva	20 mSv/ano [b]	1 mSv/ano [c]
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Pele [d]	500 mSv	50 mSv
Extremidades	500 mSv	-

[a] Os limites se aplicam à soma das doses relevantes provenientes de exposições externas daquele período e de doses comprometidas (50 anos para trabalhadores e 70 anos para público com presença de crianças) provenientes de incorporações no mesmo período.

[b] Média definida em períodos de 5 anos consecutivos, com a condição adicional de que a dose efetiva em um dado ano não pode ultrapassar 50 mSv. É implícito que a o valor vinculado para otimização deve ser 20 mSv/ano. Há restrições adicionais para mulheres grávidas.

[c] Em situações especiais, pode-se permitir valor de dose efetiva maior em um dado ano, desde que a média em 5 anos consecutivos não exceda 1 mSv.

[d] A limitação de dose efetiva proporciona proteção suficiente contra efeitos estocásticos. O limite específico é necessário para evitar efeitos determinísticos em exposições localizadas.

Para a aplicação do vínculo relativo ao risco das exposições potenciais, o procedimento adotado pela CIPR é expressar a probabilidade de uma seqüência de eventos em função da dose que será produzida caso esta seqüência realmente ocorra e limitar o risco potencial àquele apresentado pelo limite anual para exposições normais (ICRP, 1993). Então, o vínculo será expresso na forma de probabilidade máxima que deve ser permitida para seqüências de eventos que excedem uma determinada magnitude de dose. Esses limites de probabilidade de ocorrência permitidos para as seqüências de cada intervalo de dose, para cada indivíduo, são mostrados na TAB. 3.2 (ICRP,1993).

Neste contexto, Sordi (2000) estabeleceu equações que, tanto para o público como para trabalhadores, a partir de uma dose efetiva máxima, determina-se a probabilidade máxima de ocorrência admissível, e vice-versa.

Tabela 3.2. Intervalo de probabilidades anuais recomendados pela CIPR, de onde o limite de risco pode ser selecionado (ICRP, 1993).

Seqüência de eventos	Probabilidade anual
Que leva a doses tratadas como parte de exposições normais	10^{-2} a 10^{-1}
Que leva a doses onde há somente efeitos estocásticos	10^{-5} a 10^{-2}
Que leva a doses onde alguns efeitos são determinísticos	10^{-6} a 10^{-5}
Que leva a doses que podem resultar em morte	$< 10^{-6}$

3.3. Situações de Acidente ou Emergência

Em um acidente nuclear ou emergência radiológica há a perda do controle da fonte de radiação e o material radioativo pode ser lançado ao meio ambiente em quantidades muito acima daquelas propostas para as situações normais da *prática*. Esse material pode ser liberado diretamente sobre o solo, em corpos de água ou para a atmosfera. Processos naturais como erosão, chuvas, ventos e o ciclo da cadeia alimentar fazem com que o material radioativo passe de um compartimento para outro, de forma que o público pode ser exposto à radiação por várias vias.

Tipicamente as liberações para a atmosfera são as que dispersam o material radioativo mais rapidamente, portanto são as que exigem resposta mais rápida por parte das autoridades. Após uma liberação desse tipo, as pessoas podem ser irradiadas diretamente pelo material da pluma ou inalar os gases ou particulados radioativos. Conforme a pluma radioativa se dispersa, as partículas vão lentamente se depositando no solo, ou mais rapidamente se houver chuva, então o público pode ser irradiado diretamente por esses depósitos, inalar a poeira ressuspendida, ou ingerir alimentos ou água contaminados.

As pessoas expostas podem sofrer efeitos estocásticos, pois não há limiar para sua indução. Em virtude da adoção de uma relação proporcional linear entre dose e a probabilidade desses efeitos, é possível estimar a quantidade de danos biológicos sofridos por uma grande população exposta, mesmo que a probabilidade seja muito pequena para a maioria dos indivíduos.

Há ainda a possibilidade, se os limiares forem excedidos, de ocorrência de efeitos determinísticos entre os membros da população. Nesses casos, a conseqüência mais grave é a morte, que pode acontecer em pessoas mais radiossensíveis, em doses da ordem de 1 gray, causada por danos na medula óssea. Outros órgãos também podem ser afetados, sendo que o pulmão e a tireóide podem vir a receber as doses mais elevadas, causadas pela inalação ou ingestão de certos radionuclídeos, e que, por esse motivo, em geral são considerados em separado.

Tendo em vista que o material pode estar disperso em grandes áreas, e que não é possível aplicar um controle direto sobre a fonte de radiação, as doses no público só podem ser evitadas por meio de ações de proteção aplicadas nas vias de exposição, isto é, no meio ambiente, ou diretamente impondo restrições sobre as pessoas, a chamada *intervenção*.

É possível reconhecer três fases distintas no decorrer de uma emergência radiológica ou acidente nuclear, chamadas de fase inicial, fase intermediária e fase de recuperação. Apesar de não ser possível representar cada fase por um período definido de tempo, inclusive podendo se sobrepor em alguns casos, esta divisão é útil pois, em cada uma delas, são feitas diferentes considerações envolvendo a resposta aos eventos que nelas acontecem. Essa divisão é aceita como sendo comum a todas as seqüências de acidente (IAEA, 1985b).

- Fase inicial: compreende o período que se inicia desde o momento em que se toma conhecimento da possibilidade de impacto no público e se estende até as primeiras horas após o início da liberação de material, se houver. Ela se caracteriza por ser a fase onde o responsável pelo material toma medidas para tentar evitar a liberação e, também, medidas de proteção urgentes.

- Fase intermediária: inicia-se nas primeiras horas após o início da liberação do material e pode se estender por vários dias ou semanas. Geralmente, no início dessa fase a maior parte do material já foi liberada e os resultados dos monitoramentos externos

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

começam a se tornar disponíveis. Com o uso desses dados, é possível estimar as doses projetadas e evitáveis e tomar decisões sobre a introdução ou manutenção das medidas de proteção.

- Fase de recuperação: pode se estender por algumas semanas a vários anos, dependendo da natureza e magnitude da liberação. Durante esta fase, os dados dos monitoramentos ambientais podem ser usados para a tomada de decisão sobre o retorno à vida normal na área afetada. Essa decisão deve ser tomada com base em uma análise custo-benefício, discutida nas seções 4.1 e 4.2.

3.4. Princípios Básicos para Intervenção

Os princípios de proteção radiológica aplicam-se tanto a *práticas* quanto a *intervenções*, porém eles são aplicados a grandezas distintas. Nas *práticas*, os princípios são aplicados ao acréscimo de risco radiológico causado pela introdução ou modificação das atividades com a fonte de radiação. No caso da *intervenção*, os princípios se aplicam à redução ou decremento da exposição preexistente (ICRP, 1993).

Os objetivos principais de uma resposta a emergência radiológica são os seguintes (IAEA, 2002):

- Readquirir o controle da situação;
- Prevenir e mitigar as conseqüências na instalação ou local;
- Prevenir a ocorrência de efeitos determinísticos em trabalhadores e público;
- Prover os primeiros socorros e o tratamento de radioacidentados;
- Minimizar, na medida do praticável, a ocorrência de efeitos estocásticos na população;
- Prevenir, na medida do praticável, a ocorrência de efeitos não-radiológicos em indivíduos e na população;

- Proteger, na medida do praticável, a propriedade e o meio ambiente;
- Tomar as primeiras medidas para, na medida do praticável, restabelecer as condições normais.

Ao se analisar os objetivos de uma resposta a emergência radiológica, é necessário enfatizar a diferença fundamental existente entre dois grupos distintos de pessoas envolvidas na intervenção: os membros do público e os trabalhadores responsáveis pela implementação das ações de proteção.

Excetuando-se o período inicial do acidente, quando situações tais como salvamento de vidas ou medidas para prevenir condições catastróficas estão sendo tomadas, o trabalhador só receberá doses durante uma *intervenção* quando for decidido expô-lo à radiação. Isto é, apesar das fontes de radiação não estarem sob controle, existem meios para controlar a exposição do trabalhador. Neste contexto, como as exposições são deliberadas, os limites de dose para trabalhadores devem ser mantidos para essas pessoas, a não ser que haja motivos muito fortes para não considerá-los. Mesmo sendo necessária a decisão de não respeitar os limites de dose laborais, todos os esforços devem ser feitos para evitar qualquer efeito determinístico em operações, durante a *intervenção*.

Com relação aos membros do público, estes receberão doses a não ser que medidas de proteção sejam tomadas para evitá-las, isto é, as exposições não são controladas. Portanto, não há sentido em se aplicar o limite de dose para indivíduos do público, estabelecido para as *práticas*, em casos de intervenção.

Os limites de dose individuais estabelecidos para *práticas* não se aplicam às *intervenções*, pois aqueles limites foram escolhidos de forma que a exposição continuada a valores logo acima deles resultam em riscos adicionais à *prática* que são considerados inaceitáveis em situações normais, porém, em situações de acidente, seus valores são tão pequenos que podem levar a tomadas de decisão nas quais o benefício líquido obtido seria negativo.

A *intervenção* para proteção do público em casos de acidente deve estar baseada em princípios bem definidos, tecnicamente defensáveis, e que levem em

consideração aspectos éticos e sociais. Os princípios básicos internacionalmente aceitos para intervenção são derivados das recomendações da CIPR (ICRP, 1984; 1991; 1993) e podem ser enunciados da seguinte forma (IAEA, 1994; 2002):

a) Todos os esforços possíveis devem ser feitos para evitar efeitos determinísticos graves introduzindo medidas de proteção para manter as doses individuais abaixo dos limiares para esses efeitos. Desde que sempre há alguma incerteza na previsão de doses, as ações para prevenir esses efeitos devem ser tomados em valores de dose projetada algo abaixo dos limiares.

b) O *princípio da justificação da intervenção*: o conjunto de medidas de proteção proposto deve trazer mais benefícios que malefícios, isto é, somente deve ser adotado se a redução no detrimento, resultante da redução na dose, for suficiente para justificar o malefício e os custos econômicos e sociais da *intervenção*.

c) O *princípio da otimização na intervenção*: estabelece que, a forma, a extensão e a duração de uma *intervenção* devem ser otimizadas para que o benefício líquido, considerando-se a redução do detrimento da radiação e o detrimento associado à *intervenção*, seja maximizado.

3.5. Aplicação dos Princípios para Intervenção

A preocupação principal no evento de uma emergência radiológica é manter as doses individuais, causadas por todas as vias de exposição, abaixo dos limiares para os efeitos determinísticos graves. Na seqüência, os riscos de efeitos estocásticos individuais devem ser levados em consideração. De fato, a justificativa para se introduzir uma medida de proteção deve considerar, em primeiro plano, os indivíduos que estão em maior risco. Em segundo plano, deve-se considerar o ponto de vista da sociedade como um todo, pois os custos e benefícios provavelmente não estarão distribuídos entre as mesmas pessoas.

Considerações sociais podem estender a medida de proteção para cobrir um grupo maior de pessoas afetadas, ou, ao contrário, estabelecer limites práticos ou financeiros na realização da ação (Hedemann-Jensen, 1992). Por exemplo, quando uma medida protetora não é justificada do ponto de vista dos indivíduos em maior risco, pode-se ainda decidir por sua introdução para reduzir a dose coletiva e o detrimento devido ao acidente, sempre se tomando o cuidado de não causar mais dano do que benefício.

Deve-se iniciar a justificação de uma *intervenção* considerando a dose evitada individual média de toda a população exposta à qual a *intervenção* será aplicada. Em alguns casos a dose evitada coletiva pode ser usada quando a população exposta não é facilmente identificável, como por exemplo, na restrição de consumo de alimentos. Se a *intervenção* não for justificada para todo o grupo exposto, então, deve-se analisar os sub-grupos da população cujas características sejam significativamente diferentes do ponto de vista de radioproteção, como por exemplo, crianças, mulheres grávidas, pacientes de hospitais, entre outros. Nesses casos, quando há grupos tratados diferentemente, o processo de justificação deve considerar os custos sociais envolvidos.

O processo de tomada de decisão após emergências radiológicas ou acidentes nucleares sempre inclui fatores técnicos de proteção radiológica, além de fatores sociais, econômicos e políticos. É muito importante que o público seja informado de todos os aspectos levados em consideração na decisão, em especial quando a *intervenção* é decidida principalmente por fatores políticos, sociais ou econômicos, e não em bases de proteção à saúde.

Os responsáveis pela proteção radiológica devem, portanto, estar preparados para prover ao tomador de decisão as informações técnicas necessárias, de maneira sistemática, indicando quais os fatores que já foram levados em conta na estratégia de proteção proposta, de forma que o mesmo fator não seja considerado repetidamente na análise da situação. Neste sentido, os *níveis de intervenção* são bons parâmetros de referência.

3.6. Categorização das Medidas de Proteção

As principais medidas de proteção, que podem ser introduzidas em caso de emergências radiológicas, podem ser categorizadas em função da via de exposição da qual ela protege o indivíduo e da fase do acidente onde ela pode ser aplicada ou onde ela é mais eficaz (IAEA, 1985b). A TAB. 3.3 mostra essa categorização.

Tabela 3.3. Medidas de proteção categorizadas por via de exposição e fase da emergência (IAEA, 1985b).

Via de exposição potencial	Fase do acidente	Medida de proteção [a]
Irradiação externa da fonte	Inicial	Abrigo Evacuação Controle de acesso
Irradiação externa da pluma	Inicial	Abrigo Evacuação Controle de acesso
Inalação da pluma	Inicial	Abrigo Iodo estável Evacuação Controle de acesso
Contaminação da pele e roupa	Inicial e Intermediária	Abrigo Evacuação Descontaminação
Irradiação externa advinda da deposição no solo	Inicial e Intermediária	Evacuação Relocação Descontaminação
Inalação do material ressuspenso	Inicial, intermediária e de recuperação	Relocação Descontaminação
Ingestão de alimento e água contaminados	Intermediária e de recuperação	Controle de alimentos e água

[a] Em qualquer fase, para limitar a incorporação de radionuclídeos por animais de criação da cadeia alimentar humana, pode ser aplicado o uso de ração ou pastagem estocados, isto é, não contaminados.

As medidas de proteção consideradas primárias, como abrigo ou evacuação, podem ser adotadas independentemente de outras medidas. As

chamadas secundárias, como controle de acesso ou administração de iodo estável, apesar de aumentarem o grau de proteção, não podem ser adotadas independentemente. Em geral, os níveis de intervenção são determinados somente para as medidas de proteção primárias (IAEA, 1985b).

4. DETERMINAÇÃO DE NÍVEIS GENÉRICOS DE INTERVENÇÃO

Baseado em discussões internacionais e na situação econômica mundial, o OIEA recomendou NGI para as principais medidas de proteção tomadas após um acidente (TAB. 1.4). Esses valores foram selecionados para alcançar, de uma forma ampla, o maior benefício líquido em várias situações de acidente. Apesar disso, o OIEA recomenda que valores específicos sejam determinados para considerar os fatores próprios de cada situação.

Para isso, na preparação e planejamento da resposta à emergência radiológica, antes da ocorrência de acidentes, deve ser estudada a otimização das medidas de proteção, baseada em cenários genéricos e realistas de acidentes, resultando em um NGI para cada medida de proteção e cada tipo de cenário (IAEA, 1994). Esses NGI podem, então, ser os primeiros critérios de ação, usados como guias na fase inicial de um acidente.

Assim, de forma geral, todas as medidas de proteção, em algum grau, restringem a liberdade de escolha e ação das pessoas, bem como podem desviar recursos que seriam aplicados para o benefício da sociedade em outros propósitos, portanto, qualquer medida de proteção traz embutida uma carga de efeitos prejudiciais. Algumas oferecem risco direto à saúde das pessoas, como a administração de iodo estável que, em alguns casos, pode induzir o hipotireoidismo. Outras podem levar as pessoas a serem privadas de seu meio de subsistência, como agricultores que são obrigados a deixar suas terras e se desfazer de suas produções. O processo de otimização para determinação dos *níveis de intervenção* associados a cada medida de proteção deve, então, levar em consideração os fatores relevantes de proteção radiológica.

O OIEA considera os seguintes fatores como sendo de interesse da proteção radiológica na análise de uma medida de proteção, apesar de alguns deles não serem claramente quantificáveis (IAEA, 1994):

- Os riscos evitáveis, individual e coletivo, causados pela exposição à radiação;
- Os riscos físicos, individual e coletivo, causados pela introdução da medida de proteção;
- Os riscos, individual e coletivo, dos trabalhadores empregados na implementação da medida de proteção;
- O custo monetário da medida de proteção;
- Restabelecimento da segurança do público e dos trabalhadores pela implementação da medida de proteção;
- Ansiedade causada pela implementação da medida de proteção;
- Ruptura social causada pela implementação da medida de proteção.

Como os *níveis de intervenção* são usados na tomada de decisão para a introdução de medidas de proteção, e os valores das doses evitadas individuais nas pessoas envolvidas são um parâmetro importante nessa tomada de decisão, é natural que os níveis de intervenção acabem sendo expressos nessa forma. No caso de alimentos contaminados, podem ser definidos também em termos de concentração (Bq/kg). O OIEA (IAEA, 1997) faz distinção entre *níveis de intervenção*, expressos em termos de dose evitada ou concentração, que estão mais associados à proteção contra efeitos estocásticos, e *níveis de ação*, que são valores de dose ou concentração, acima dos quais alguma ação deve ser tomada, e que estão mais associados à proteção contra efeitos determinísticos.

4.1. Teorias para Tomada de Decisão

Três teorias para tomada de decisão são as mais utilizadas como base filosófica para se adotar uma das técnicas de ajuda para tomada de decisão: a *teoria do custo-benefício*, a *teoria da escolha social* e a *teoria da decisão* (IAEA, 1994).

A *teoria do custo-benefício* prega que as várias alternativas disponíveis devem ser analisadas de forma a comparar sistematicamente as vantagens (benefícios) e desvantagens (custos) resultantes da escolha de cada alternativa.

A *teoria da escolha social* considera que o critério apropriado para uma tomada de decisão é a síntese racional das preferências de todos os indivíduos que serão afetados pela decisão.

A *teoria da decisão* coloca o conceito de um tomador de decisão social, com a responsabilidade de decidir pela alternativa que considera a melhor, considerando os fatores objetivos e subjetivos e a racionalização.

Essas três teorias não são mutuamente exclusivas, e sim, internamente consistentes, de forma que cada uma pode contribuir para o planejamento de uma *intervenção* durante ou após uma emergência radiológica. A *teoria do custo-benefício* pode ter maior peso em um período de preparação à emergência, quando o desenvolvimento de critérios numéricos para introdução de medidas de proteção exige comparações sistemáticas entre alternativas. A *teoria da decisão* tem papel importante na fase inicial da emergência, quando um tomador de decisão deve decidir pela implementação ou não de uma medida de proteção, baseado em muitos fatores subjetivos. A *teoria da escolha social* é mais associada com a fase de recuperação da emergência, quando, por exemplo, a decisão de um reassentamento depende muito da disposição ou vontade das pessoas envolvidas.

Como o objetivo dos NGI é prover o tomador de decisão, ou as pessoas potencialmente afetadas, de informações técnicas capazes de classificar as várias opções de proteção, de forma a auxiliar na tomada de decisão sobre a sua introdução ou não, a *teoria do custo-benefício* se mostra a mais adequada para a tarefa e por isso foi a adotada neste trabalho.

4.2. Análise Custo-Benefício

O benefício total da introdução de uma determinada medida de proteção comparado com a sua não adoção, em termos de custo-benefício, pode ser expressa por (IAEA, 1993):

$$B = Y_0 - (Y + R + X + A_i + A_s + B_c) \qquad (4.1)$$

Onde:

- B é o benefício líquido com a introdução da medida de proteção;
- Y_0 é uma expressão do detrimento radiológico (estocástico e determinístico) associado à não introdução da medida;
- Y é uma expressão do detrimento residual de radiação (estocástico e determinístico) quando a medida é tomada;
- R é a expressão dos riscos físicos associados à medida;
- X é a expressão dos recursos e esforços necessários para implementar a medida;
- A_i é uma expressão da ansiedade individual e ruptura causada pela medida;
- A_s é uma expressão da ruptura social causada pela medida;
- B_c é uma expressão do benefício pela segurança readquirida causada pela medida.

Todas as parcelas da equação 4.1 são dependentes do número de pessoas afetadas e do tempo que a medida de proteção é mantida, sendo que todas possuem um certo grau de incerteza associado. Elas também devem ser expressas na mesma unidade. Convencionalmente, em análises custo-benefício elas são expressas em unidades monetárias (IAEA, 1994).

No procedimento para a determinação dos NGI, é importante deixar claro quais as parcelas da equação 4.1 que foram incluídas e quais foram deliberadamente excluídas do processo, para que o tomador de decisão possa fazer o julgamento considerando cada fator somente uma vez. As proposições adotadas na análise podem ser resumidas da seguinte forma (IAEA, 1993):

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

- A autoridade nacional disponibiliza recursos e realiza esforços para evitar um efeito na saúde induzido por radiação ionizante, tanto quanto faria para evitar riscos à saúde similares em magnitude e natureza;

- Os riscos físicos normais associados à medida de proteção já são considerados;

- A ruptura dos indivíduos afetados pela medida de proteção é levada em consideração;

- Outros fatores de natureza social, política, psicológica, ou mesmo cultural, foram deliberadamente excluídos;

- Os níveis genéricos selecionados formam um conjunto logicamente consistente que foram desenvolvidos, na medida do possível, para serem simples de entender e aplicar.

Pelo exposto acima fica entendido que o benefício líquido total, B, da equação 4.1 é um benefício para a sociedade como um todo, bem como os esforços e recursos aplicados na medida de proteção, X, são provenientes de toda a sociedade. Por outro lado, os detrimentos à saúde envolvidos, Y_0 e Y, são relacionados aos indivíduos protegidos, e não à população como um todo.

Para que se possa comparar os custos associados à implementação da medida de proteção, que podem ser identificados com relativa facilidade, aos detrimentos à saúde envolvidos, é necessário, de alguma forma, valorar o dano biológico causado pela radiação.

4.3. Valor do Detrimento à Saúde (α)

Assumindo que a relação entre a dose equivalente e a probabilidade de indução de um efeito na saúde é linear, resulta que a *dose coletiva* pode ser utilizada como um indicador objetivo do *detrimento* causado por uma dada exposição de uma população à radiação, caso todas as doses estejam na região estocástica, como visto no item 2.5.

Desta forma, atribuindo um valor monetário para a unidade de dose coletiva, ou seja, um custo em dólares americanos, em nosso país, especificado em moeda corrente, para o Sv.pes, é equivalente a atribuir um valor ao próprio *detrimento* (Stokell *et al.*, 1991), como pode ser inferido da equação 2.7.

O termo α pode ser definido como o valor monetário da dose coletiva unitária, e é composto de dois termos: a probabilidade do efeito e o custo do efeito. Isto pode ser expresso da seguinte forma:

$$\alpha = \sum_i (\text{Probabilidade do efeito i por unidade de dose coletiva}) \times (\text{Custo do detrimento do efeito i}) \qquad (4.2)$$

O OIEA utilizou uma versão do método do capital humano, que será examinado na seção 4.3.2, para determinar o valor internacional mínimo que deve ser alocado para evitar uma unidade de dose coletiva em casos de emissões radioativas que atravessam as fronteiras do país emissor (IAEA, 1985a). Posteriormente esse método foi modificado para refletir as recomendações atuais da CIPR (IAEA, 1994). Este método é o adotado neste trabalho.

4.3.1. Determinação da probabilidade do efeito

O método propõe que o conjunto de efeitos causados pela exposição à radiação leva a uma perda estatística de expectativa de vida. Para refletir o impacto de perda de expectativa de vida resultante de uma dose coletiva de

1Sv.pes são feitas quatro considerações baseadas nas recomendações da CIPR (ICRP, 1991):

a) A perda média de vida saudável associada com um caso de câncer fatal induzido por radiação é de 13 anos;

b) O coeficiente nominal de probabilidade para câncer fatal induzido por radiação é $5,0 \times 10^{-2}$ $(Sv.pes)^{-1}$;

c) O coeficiente de detrimento para cânceres não fatais é $1,0 \times 10^{-2}$ $(Sv.pes)^{-1}$;

d) O coeficiente de detrimento para indução de danos hereditários graves em todas as gerações é $1,3 \times 10^{-2}$ $(Sv.pes)^{-1}$.

Com base nessas considerações, a perda estatística de expectativa de vida associada a 1 Sv.pes pode ser avaliada por:

$$(5 \times 10^{-2} + 1 \times 10^{-2} + 1,3 \times 10^{-2}) \times 13 \approx 1 \text{ a.}(Sv.pes)^{-1} \qquad (4.3)$$

Por causa das incertezas associadas aos coeficientes de risco, o valor obtido somente pode ser considerado acurado dentro de um fator de aproximadamente 2 (IAEA, 1994). Deve-se notar que a expressão 4.3 assume que o fator de eficácia de dose e taxa de dose é 2, como mostrado na seção 2.3, isto é, quando a dose absorvida é menor que 0,2 Gy ou taxa de dose é menor que 0,1 $Gy.h^{-1}$.

4.3.2. Determinação do custo do efeito

Existem muitos métodos para estimar o valor, ou o custo para a sociedade, da perda de expectativa de vida, e todos eles apresentam prós e contras. Apesar das bases de cada um desses métodos serem muito distintas, um estudo da

CIPR mostrou que muitos desses métodos, no contexto de proteção radiológica. chegam a valores da mesma ordem de grandeza (IAEA, 1985a).

Stokell *et al.* (1991) fizeram um estudo relevante sobre esses métodos de estimativa de custo da perda de expectativa de vida. O método de *compensações legais* extrai valores implícitos de decisões da justiça em casos envolvendo compensações financeiras. Este método coloca que o valor estipulado pela justiça para essas compensações reflete a visão da sociedade sobre o custo da perda de expectativa de vida. Por outro lado, em caso de morte, este método acaba compensando apenas os parentes das vítimas. Outro fator que influencia no valor da compensação é a presença de culpa, pois o juiz pode estipular uma quantia muito maior para fins de punição.

Outro método é o de *indenizações de seguros*, que considera as indenizações pagas por empresas seguradoras como sendo o valor aceito para a perda da expectativa de vida. Neste caso, as indenizações tendem a refletir a preocupação da pessoa com seus dependentes do que a estimativa do valor que ela atribui a sua própria vida.

Existem métodos que possuem as bases mais harmônicas com os conceitos utilizados em proteção radiológica e que, portanto, são mais utilizados nessa área. Exemplos desses métodos são o de *disposição para pagar* e o do *capital humano.*

No método de *disposição para pagar*, é elaborada uma pesquisa para avaliar que valor a população interessada estaria disposta a pagar para reduzir os riscos causados pela radiação ionizante. As incertezas deste método podem advir da imprecisão das perguntas formuladas na pesquisa, assim como do instrumento de coleta de dados e da desinformação dos entrevistados, assim como da sua subjetividade com relação ao assunto (Mariano, 2001), por exemplo, se os entrevistados já estiverem sob um controle radiológico, como trabalhadores de uma usina nuclear, podem subavaliar sua disposição para pagar.

No método do *capital humano* é considerado, em primeira aproximação, e em bases puramente econômicas, que o grau de cuidado com a saúde é proporcional ao produto interno bruto do país. Neste caso, o valor mínimo associado à perda estatística de um ano de vida é o produto interno bruto anual *per capita* do país (PIBpc).

4.3.3. Determinação do valor de α

Com base no método do capital humano, que é o recomendado pelo OIEA (IAEA, 1994), o valor de α pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$\alpha = 1 \times \text{PIBpc} \quad \$.(\text{Sv.pes})^{-1} \tag{4.4}$$

O OIEA, considerando os países mais desenvolvidos, adota para suas avaliações um PIBpc de US$ 20.000. Como deve ser associado um fator de 2, para mais ou para menos, na perda estatística de expectativa de vida associada a 1 Sv.pes, isso faz com que o valor de α varie de US$ 10.000 a US$ 40.000 nas avaliações do OIEA (IAEA, 1994).

4.4. Níveis Genéricos de Intervenção Otimizados

Com base na *teoria do custo-benefício* e observando a equação 4.1, conclui-se que uma intervenção será justificada quando o valor do benefício líquido, B, é positivo e a condição ótima será alcançada quando B for máximo.

O detrimento radiológico evitado por uma dada medida de proteção pode ser expresso por:

$$\Delta Y = Y_0 - Y \tag{4.5}$$

Onde:

Y_0 é uma expressão do detrimento radiológico (estocástico e determinístico) associado à não introdução da medida;

Y é uma expressão do detrimento residual de radiação (estocástico e determinístico) quando a medida é tomada.

Em muitos casos, o custo associado ao detrimento radiológico evitado (ΔY) pode ser considerado proporcional à dose coletiva evitada, podemos escrever então:

$$\Delta Y = \alpha \times \Delta S \tag{4.6}$$

Onde:

α é o custo para evitar uma unidade de dose coletiva;

ΔS é a dose coletiva evitada.

O custo da medida de proteção, *X*, pode ter um componente que é independente do *nível de intervenção*, *I*, e outro que é dependente dele. Isto pode ser expresso como:

$$X = X_0 + X(I) \tag{4.7}$$

O benefício líquido como função do tempo (t) pode ser expresso por:

$$B(t) = \Delta Y(t) - X(t) = \alpha \times \Delta S(t) - X(t) \tag{4.8}$$

Analisando as medidas de proteção que envolvem movimentação de pessoas, podemos, em primeira aproximação, expressar o custo de movimentar N pessoas de suas casas como:

$$X(t) = (X_1 + A \times t) \times N \tag{4.9}$$

Onde:

X_1 é o custo inicial, *per capita*, para transportá-las;

A é custo contínuo, *per capita* e por unidade de tempo, para acomodar as pessoas no outro local.

O benefício líquido é a diferença entre o valor da dose evitada e dos custos de movimentar e manter as pessoas no outro local:

$$B(t) = \alpha \times \Delta S(t) - (X_1 + A \times t) \times N \qquad (4.10)$$

A medida é justificada quando B(t) > 0, isto é:

$$\frac{\Delta S(t)}{N} > \frac{(X_1 + A \times t)}{\alpha} \qquad (4.11)$$

Como a dose coletiva evitada dividida pelo número de indivíduos é a dose efetiva média evitada, isto é:

$$\frac{\Delta S(t)}{N} = \Delta \bar{E}(t) \qquad (4.12)$$

Pode-se inferir das expressões 4.11 e 4.12 que alguns dos NGI, como para abrigo, evacuação, relocação temporária e reassentamento, podem ser estimados por meio do levantamento dos custos envolvidos na medida de proteção e pelo valor de α.

$$NGI = \frac{(X_1 + A \times t)}{\alpha} = \frac{custo\ individual\ da\ medida\ de\ proteção}{\alpha} \qquad (4.13)$$

4.5. O NGI para a Administração de Iodo Estável

A administração de iodo estável a toda uma população exige um certo grau de preparação. Há opções que podem ser simples, como disponibilizar tabletes

de iodeto de potássio em farmácias, ou estocar esse tabletes em centros de emergência locais para rápida distribuição à população, ou podem exigir o envolvimento direto da população, como a pré-distribuição desses tabletes aos responsáveis de cada residência de uma área prevista (IAEA, 1994). A escolha da estratégia a ser utilizada influencia fortemente o *nível de intervenção* a ser determinado para esta medida de proteção.

O dano à saúde associado à administração de iodo estável também deve ser considerado na determinação do *nível de intervenção*. Um estudo indica que a probabilidade de efeitos adversos do iodo estável na população, incluindo o hipertireoidismo, hipotireoidismo, tireotoxicose e bócio, está no intervalo de 10^{-7} a 10^{-6}, para doses terapêuticas diárias de 300 mg (IAEA, 1994). Nesse mesmo estudo, o risco de morte é estimado ser da ordem de 3×10^{-9}. Por outro lado, esses valores de probabilidade de efeitos colaterais variam muito na literatura, principalmente por causa das diferenças de ingestão de iodo entre as dietas de várias regiões, bem como a existência de distúrbios endêmicos da tireóide, como o bócio.

A experiência obtida na Polônia, após o acidente de Chernobyl, mostrou que a administração de iodo estável em dez milhões de crianças não acarretou em efeitos adversos. Entre os adultos, observou-se a ocorrência de efeitos graves com probabilidade de 4×10^{-7} e efeitos moderados com probabilidade de 6×10^{-4} (IAEA, 1994). Outro estudo indicou que a probabilidade de pessoas idosas com bócio desenvolverem hipertireoidismo, após a ingestão de 100 mg diários de iodeto de potássio, por 14 dias, é da ordem de 7×10^{-2} (IAEA, 1994). Estes dados indicam que a idade seria um fator que teria um peso grande na determinação do NGI para administração de iodo estável.

Os fatores mencionados acima dificultam a determinação de um único valor para o NGI para administração de iodo estável, e teriam um peso maior que a questão econômica da implementação dessa medida. Considerando ainda que essa medida de proteção quase sempre será tomada em conjunto com outra, como o abrigo ou a evacuação, decidiu-se não determinar um NGI para administração de iodo estável neste trabalho.

5. RESULTADOS

5.1. O Valor de α para o Brasil

O produto interno bruto anual, PIB anual, é um dos principais indicadores de uma economia. Ele revela o valor de toda a riqueza gerada no país durante o ano, considerando-se os setores econômicos da agropecuária, indústria e serviços. O PIB é calculado trimestralmente pelo Departamento de Contas Nacionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, e o PIB anual é apresentado em dezembro (Contas, 2002).

Para fazer o cálculo do PIB trimestral, o Departamento de Contas Nacionais primeiro coleta os dados que já estão disponíveis em outros departamentos do IBGE, como os relativos à indústria e agropecuária. Esses dados referem-se às quantidades dos produtos gerados ou produzidos, ainda sem um preço estabelecido. Informações não disponíveis nos outros departamentos, como as de energia, comunicações e sobre impostos, são solicitadas diretamente às empresas e aos governos municipais, estaduais e federal.

O IBGE aguarda a resposta das empresas e, caso elas não informem em tempo hábil para inclusão no cálculo do PIB, os dados são estimados, dependendo do caso, com base no comportamento do trimestre anterior ou dos últimos 12 meses. A projeção não leva em conta a evolução do cenário econômico, como o aumento de juros, somente observa a evolução passada de determinado setor ou empresa que deixou de dar as informações. O único setor que o Departamento de Contas Nacionais do IBGE pesquisa diretamente é o de impostos, no qual os dados são coletados nas diversas esferas de governo. Nos demais, as perguntas são encaminhadas às empresas ou usadas informações de outros departamentos do órgão.

De posse de todos os dados consolidados, os técnicos atribuem valores para cada produto para chegar ao cálculo do PIB. Para os produtos vendidos ao consumidor final, esses valores são estabelecidos com base no Índice de Preços ao Consumidor Amplo, IPCA, do próprio IBGE. No caso de itens comercializados entre as indústrias e empresas, é utilizado o Índice de Preços no Atacado, IPA, da Fundação Getúlio Vargas, FGV. Dependendo do preço de cada produto e da quantidade produzida, o IBGE atribui pesos aos itens e aos ramos de atividade da economia para calcular o PIB. A indústria de transformação, por exemplo, tem peso de 22,48% no cálculo do PIB. Os pesos dados aos produtos no PIB podem ser diferentes dos atribuídos na Pesquisa Mensal da Indústria, que mede a produção do setor. Isso porque no primeiro caso levam-se em conta os preços e, no segundo, somente consideram-se as quantidades (Contas, 2002).

O PIBpc tem origem no PIB anual, que é dividido pelo número de pessoas residentes no país, que é estimado pelo censo demográfico nacional (Contas, 2002).

Utilizando-se o dado oficial de PIBpc de R$ 6387,00 (Contas, 2002), referente ao ano 2000, ano do último censo demográfico no país, foi aplicada a equação 4.4 para se calcular o valor de α para o Brasil. Para a conversão monetária do valor do PIBpc, dado em reais, para dólares americanos, foi utilizado o valor do câmbio comercial médio na data de 29/12/2000, quando US$ 1.00 correspondia a R$ 1,9546 (Base, 2002). Assim:

$$\alpha = 1 \times 6387{,}00 \times \frac{1}{1{,}9546} \approx 3268 \text{ US\$.(Sv.pes)}^{-1} \qquad (5.1)$$

O valor estimado de α para o Brasil, calculado desta forma, é mostrado na TAB. 5.1.

No Brasil, o valor de α adotado legalmente é estabelecido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e, desde 1988, é o equivalente a 10000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ (CNEN, 1988).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

Tabela 5.1. Valores de α para o Brasil, em dólares americanos, com base em valores do ano 2000.

Local	α (US$.Sv^{-1}.pes^{-1})
Brasil (calculado)	3268
Brasil (oficial) [a]	10000

[a] Valor adotado em norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear em 1988 (CNEN, 1988).

Para maiores detalhes sobre o valor real de α, pode-se consultar o trabalho de Sahyun e Sordi (2000), onde a evolução desse valor, para o Brasil, é estimada desde 1970 até o ano 2025, considerando três correntes econômicas distintas.

5.2. Estimativa dos Custos do Abrigo

Como a medida de proteção de abrigo consiste, em geral, em se permanecer fechado na própria residência, onde não há necessidade de transporte e a alimentação já está disponível, considera-se que o custo mais importante nesse caso é aquele causado pela perda de produtividade da população envolvida. Este custo pode ser estimado a partir do produto interno bruto anual *per capita* dividido pelo número de dias no ano. Como o abrigo por mais de dois dias é por demais prejudicial para a população (IAEA, 1994), o NGI para abrigo é estimado para este período de tempo. Assim:

$$Custo = \frac{6387{,}00}{366} \times 2 \approx 35 \text{ R\$.pes}^{-1} \tag{5.2}$$

O valor individual estimado para o custo do abrigo, com base no ano 2000, que é bissexto, é mostrado na TAB. 5.2.

5.3. Estimativa dos Custos da Evacuação

No caso da evacuação, há outros custos que estão envolvidos além da perda de produtividade da população afetada. O custo do transporte das pessoas para o local de alojamento, e posterior retorno, bem como os custos de acomodação e alimentação das pessoas, podem ser considerados se forem significativos em relação ao primeiro.

O tempo de evacuação não deve ultrapassar alguns dias, porém deve ser longo o bastante comparado com o tempo despendido para sua implementação e suficiente para que quaisquer riscos e custos iniciais sejam compensados pelo detrimento evitado. Por outro lado, não deve ser tão longo que uma relocação temporária ou um reassentamento possam se tornar mais apropriados (IAEA, 1994). Com base nessa argumentação, o período de 7 dias (1 semana) foi selecionado para a determinação do NGI para evacuação.

A perda de produtividade foi calculada da mesma forma que para o abrigo, porém o período considerado foi o de sete dias.

Empresas de transporte urbano mantêm controle de seus custos operacionais e algumas entidades mantêm estatísticas sobre esses valores (Estatísticas, 2000). Considerando-se o custo operacional por quilômetro rodado, e estimando-se a distância até o alojamento, chega-se a um valor estimado para o custo de transporte.

A Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos, NTU, com base em informações enviadas por sindicatos e entidades regionais de transportes urbanos, calcula o custo por quilômetro rodado da operação de ônibus urbanos. Esses cálculos levam em consideração os gastos com manutenção dos veículos, combustível e pagamento dos funcionários, inclusive os direitos trabalhistas. Esses custos são ponderados para as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Recife, Porto Alegre, Salvador, Fortaleza e Goiânia, dando origem a um custo médio que é divulgado para os meses de abril e outubro de cada ano (Estatísticas, 2000). O custo médio por quilômetro rodado obtido por

esta metodologia, em outubro de 2000, foi de R$ 2,28. Esse foi o custo considerado neste trabalho, para veículos com capacidade de quarenta passageiros.

A distância ao local de acomodação não deve ser muito grande, pois os custos aumentam com o deslocamento, e a população envolvida pode ser significativa, o que multiplica os custos. Por outro lado, a distância deve garantir que a evacuação promova um grau de proteção adequado à população, com relação aos valores de dose evitada. Essas distâncias podem variar consideravelmente dependendo do evento e, com base nas zonas de planejamento de emergência adotadas pela CNEN para o caso de emergência geral em um reator nuclear de potência (CNEN, 1997), foi selecionada a distância de 5 km para este trabalho.

O custo da alimentação no período de evacuação pode ser estimado com base no custo da ração essencial mínima, REM, (Brasil, 1938) que, na maioria das regiões do Brasil, é composta de leite tipo C (15 L), açúcar (3 kg), café em pó (600 g), pão francês (6 kg), manteiga (900 g), tomate (9 kg), banana (7,5 dz), farinha de trigo (1,5 kg), batata (6 kg), feijão carioquinha (4,5 kg), arroz agulhinha (3 kg), carne bovina de primeira (6 kg) e óleo de soja/banha (900 mL/1,5 kg). Na região nordeste a farinha de trigo é substituída pela farinha de mandioca e a batata não entra na composição da REM (Cesta, 2001). O custo mensal da REM é pesquisado por entidades, como o Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio-econômicos, DIEESE, em diversas capitais do país. O maior custo mensal da REM nas cidades pesquisadas, em dezembro de 2000, foi de R$ 119,54, na cidade de São Paulo, para uma família de 2 adultos e 2 crianças (Cesta, 2001). Este foi o valor utilizado neste trabalho.

Os custos de acomodação podem variar muito, pois, em geral, são utilizados escolas e centros comunitários como alojamento. Alguns custos podem ser estimados pela infra-estrutura a ser criada, por exemplo, com a compra de colchonetes e cobertores. Neste trabalho o valor médio de um conjunto de colchonete e cobertor é estimado em R$ 30,50, com base em preços divulgados por estabelecimentos comerciais. Assim:

$$Custo = \left(\frac{6387{,}00 \times 7}{366}\right) + \left[\frac{2{,}28 \times (5+5)}{40}\right] + \left(\frac{119{,}54 \times 7}{31 \times 4}\right) + 30{,}50 \approx 160 \text{ R\$.pes}^{-1} \qquad (5.3)$$

O valor *per capita* estimado para o custo da evacuação é mostrado na TAB. 5.2.

5.4. Estimativa dos Custos da Relocação Temporária

Na relocação temporária há que se considerar a perda de produtividade da população envolvida, o transporte de ida para o novo local e posterior retorno das pessoas, e os custos de aluguel da acomodação. Esta medida é tomada por um período da ordem de meses, porém os custos no primeiro mês são substancialmente maiores, por isso é considerado em separado.

O local da relocação temporária não pode ser muito distante da região de moradia da população para não haver um impacto social muito grande com relação à ocupação do indivíduo, isto é, deve-se tentar manter o emprego do indivíduo, considerando-se fatores como o tempo de deslocamento ao local de trabalho. Há também que se considerar a proximidade com as escolas freqüentadas pelas crianças, entre outros critérios. Por esses motivos, deve-se procurar locais para relocação num raio da ordem de algumas dezenas de quilômetros em torno do local original. Neste trabalho adotou-se a distância de 30 km.

Custos para aluguel de moradias são pesquisados por entidades ligadas à administração de imóveis, como o Sindicato das Empresas de Compra, Venda, Locação e Administração de Imóveis Residenciais e Comerciais de São Paulo, SECOVI (Pesquisa, 2001), e podem ser utilizados como base para a determinação dos custos da relocação. O município de São Paulo possui o nível de vida mais elevado do país e, naturalmente, detém as características associadas a um padrão de vida mais elevado, incluso os custos de moradia (Pesquisa, 1996). Este trabalho considera os custos de aluguel deste município como referência, mas adota o menor valor médio dentre as regiões pesquisadas,

no caso a região Leste-3, para efeito de compensação. O valor do aluguel mensal de um apartamento de 2 dormitórios, com 1 vaga de garagem, na região Leste-3, que inclui os bairros do Itaim Paulista, Guaianazes, Cidade Tiradentes, Parque do Carmo, São Mateus e Iguatemi, era de R$ 354,00 em janeiro de 2001 (Pesquisa, 2001).

A família média paulistana possuía 3,8 pessoas em 1996 (Pesquisa, 1996), o número de 4 pessoas foi adotado neste trabalho, tornando-se consistente com o valor considerado pelo DIEESE para a determinação do custo da REM (Cesta, 2001). Também se considerou que é normal a cobrança de um valor correspondente a 1 mês de aluguel no início da vigência de um contrato, a título de luvas, quando não se apresenta a figura do fiador. Considerou-se também a necessidade deslocamentos adicionais da ordem de grandeza da distância da relocação, isto é, 30 km, nos 23 dias úteis do mês. Assim, para o primeiro mês de relocação, calculou-se o custo individual por:

$$Custo = \left(\frac{6387{,}00 \times 30}{366}\right) + \left(\frac{2 \times 354{,}0}{4}\right) + \left(\frac{2{,}28 \times 30 \times 23}{40}\right) \approx 740 \text{ R\$.pes}^{-1} \qquad (5.4)$$

Para os meses subseqüentes, por causa de fatores negativos da mudança do local de residência, considerou-se que há uma perda de produtividade correspondente a duas semanas a cada mês, bem como há a necessidade de, pelo menos, quatro deslocamentos adicionais da ordem de grandeza da distância da relocação, isto é, um total de 120 km, para solução de pendências advindas da medida de proteção. Assim, o custo individual para a relocação nos meses posteriores ao primeiro foi estimado por:

$$Custo = \left(\frac{6387{,}00 \times 14}{366}\right) + \left(\frac{1 \times 354{,}0}{4}\right) + \left(\frac{2{,}28 \times 120}{40}\right) \approx 340 \text{ R\$.pes}^{-1} \qquad (5.5)$$

Os valores estimados para os custos de relocação, tanto no primeiro mês, quanto nos meses subseqüentes, são mostrados na TAB. 5.2.

5.5. Estimativa dos Custos do Reassentamento

No reassentamento há custos iniciais elevados, em especial para a construção de moradias e no transporte da população para o novo local. Apesar de haver custos distribuídos ao longo do tempo, estes serão muito menores que os custos iniciais.

O IBGE, juntamente com a Caixa Econômica Federal, CEF, mantêm estudos sobre custos da construção civil em todos os estados e, com base nessas pesquisas, a partir da ponderação dos custos de projetos residenciais no padrão normal de acabamento, são calculados os custos médios para cada Estado. Ponderando-se os custos dos estados são determinados os custos regionais e a partir destes, o custo nacional. Estes custos dão origem aos índices por Estado, Região e Brasil. Esses índices referem-se ao custo do metro quadrado de construção no canteiro de obras considerando-se os materiais e a mão-de-obra, sendo que aos salários são acrescidos os encargos sociais totalizando 122,82%. Não estão incluídas as despesas com projetos em geral, licenças, seguros, administração, financiamentos, equipamentos mecânicos, como elevadores, compactadores, exaustores, ar condicionado e outros. Também não estão incluídos os lucros da construtora e da incorporadora (IBGE, 2000).

As pesquisas do IBGE e da CEF estabelecem que um mesmo serviço pode ser executado segundo diferentes especificações que atendem a quatro padrões de acabamento: alto, normal, baixo e mínimo, porém, o índice nacional é calculado para projetos residenciais no padrão normal de acabamento. Em 2000, o índice fechou o ano com o valor de R$ 323,96 por metro quadrado (IBGE, 2000). Este é o índice que é adotado neste trabalho.

Em 1996, cerca de 77% das pessoas no município de São Paulo viviam em casas, térreas ou assobradadas, com a média de 3,8 cômodos (Pesquisa, 1996). Casas residenciais com dois quartos são as mais freqüentes, com área construída da ordem de 62 m^2. Considerando-se a taxa de ocupação, este trabalho adota o valor de 100 m^2 para a área de terreno para cada construção. Estima-se que o custo do metro quadrado de terreno seja da ordem de um terço do custo para a

construção. Neste trabalho adota-se o custo de R$ 100,00 por metro quadrado de terreno para construção.

Em geral, o reassentamento se dá em regiões afastadas do local original de moradia, da ordem da centena de quilômetros. Isto se dá pela dificuldade de se conseguir grandes espaços abertos próximos a cidades já formadas. Por causa da ordem de grandeza das distâncias, os indivíduos não podem manter seus empregos originais, levando a dificuldades para recolocação no mercado de trabalho. É adotada a distância de 100 km como deslocamento da população para o reassentamento. Também é adotado o intervalo de 1 mês para que o indivíduo consiga recolocação no mercado de trabalho. Assim, o custo individual para reassentamento é calculado por:

$$Custo = \left(\frac{6387{,}00 \times 30 \times 1}{366}\right) + \left(\frac{2{,}28 \times 100}{40}\right) + \left(\frac{100 \times 100}{4}\right) + \left(\frac{62 \times 323{,}96}{4}\right) \approx 8000 \text{ R\$.pes}^{-1} \qquad (5.6)$$

Os custos estimados para reassentamento são mostrados na TAB. 5.2.

Tabela 5.2. Custos estimados para as medidas de proteção (ano base 2000).

Medida de proteção	Custo estimado (R$ *per capita*)
Abrigo	35 [a]
Evacuação	160 [b]
Relocação temporária	740 [c]
	340 [d]
Reassentamento	8000

[a] Estimado para dois dias de abrigo.
[b] Estimado para uma semana de evacuação.
[c] Estimado para o primeiro mês.
[d] Estimado para qualquer mês subseqüente.

5.6. Estimativa dos Níveis de Intervenção Otimizados

Aplicando-se a equação 4.13, utilizando-se os valores calculados dos custos das medidas de proteção e o valor calculado de α, corrigidos

monetariamente para o ano 2000, determinou-se os níveis genéricos de intervenção para cada uma das medidas de proteção consideradas (TAB. 5.3).

Tabela 5.3. Níveis genéricos de intervenção estimados (ano base 2000).

Medida de proteção	NGI estimado (mSv)	NGI recomendado [a] (mSv)
Abrigo	6 [b]	10 [b]
Evacuação	25 [c]	50 [c]
Relocação temporária	116 [d]	30 [d]
	53 [e]	10 [e]
Reassentamento	1250 [f]	1000 [f]

[a] Níveis genéricos de intervenção recomendados pelo OIEA (IAEA, 1994).
[b] Dose evitada em menos de dois dias.
[c] Dose evitada em menos de uma semana.
[d] Dose evitada no primeiro mês.
[e] Dose evitada em um mês subseqüente.
[f] Dose evitada no tempo de vida.

Deve-se lembrar que, tanto a CIPR (ICRP, 1966; 1991) quanto o OIEA (IAEA, 1982; 1997) recomendam, e a norma nacional da CNEN (CNEN, 1988) exige que a dose acumulada durante toda a vida de um trabalhador não ultrapasse 1 Sv. Dessa forma, a medida de proteção de reassentamento seria tomada por causa de uma dose projetada de 1 Sv, e não por causa de um NGI para reassentamento de 1250 mSv.

5.7. Estudo de Sensibilidade

Todo estudo envolve algumas premissas, vários dados, dos quais, alguns são apenas estimados, e julgamentos de valores subjetivos. Por esses motivos, é importante conhecer quão robusto é o resultado de uma análise com relação aos vários parâmetros envolvidos. O estudo de sensibilidade testa a importância relativa das várias fontes de incerteza introduzidas durante o processo, bem como dos julgamentos de valores. O resultado do estudo de sensibilidade mostra se a solução analítica permanece a mesma para qualquer mudança realista nas

premissas ou nos parâmetros, de forma que o tomador de decisão possa conhecer até que ponto o resultado é confiável (Stokell *et al.*, 1991).

5.7.1. Sensibilidade com relação ao valor de α

Na determinação dos NGI, os coeficientes de risco para os efeitos da radiação carregam muitas incertezas, sendo que só podem ser considerados acurados dentro de um fator de aproximadamente 2 (IAEA, 1994). Por esse fato, a estimativa do valor de α também carrega uma incerteza desta ordem. É muito útil um estudo de sensibilidade dos NGI estimados, de forma a verificar a estabilidade destes, frente à variabilidade do α.

O fator de incerteza 2, aplicado sobre o α estimado, faria seu valor variar de 1634 a 6536 US$.(Sv.pes)$^{-1}$. Por outro lado, o OIEA recomenda que o valor mínimo de α seja 3000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ (IAEA, 1985a).

Há outros valores de α que também são significativos e foram incluídos nos estudos de sensibilidade. O valor de 20000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ foi utilizado pela IAEA para estabelecer os níveis de intervenção recomendados atualmente. O fator de incerteza 2 faz esse valor variar entre 10000 e 40000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$, de forma que esses valores também foram incluídos no estudo de sensibilidade.

O valor de 10000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ também é significativo por ser o valor adotado legalmente pelo Brasil (CNEN, 1988), e ainda é o valor recomendado pela CIPR para países que não tenham calculado seu valor de α.

A TAB. 5.4 mostra os valores de níveis genéricos de intervenção, baseados sempre nos custos de proteção calculados para este trabalho, para os vários valores de α escolhidos.

Tabela 5.4. Níveis genéricos de intervenção estimados para vários valores de α.

Medida de proteção	NGI (mSv)					
	α = 3000	α = 3268	α = 6536	α = 10000	α = 20000	α = 40000
Abrigo[a]	6	6	3	2	1	0,5
Evacuação[b]	27,3	25	12,5	9	4,5	2,3
Relocação temporária	126[c] 58[d]	116[c] 53[d]	58[c] 26,5[d]	38[c] 18[d]	19[c] 9[d]	9,5[c] 4,5[d]
Reassentamento[e, f]	1364	1250	625	410	205	102,5

[a] Dose evitada em menos de dois dias.
[b] Dose evitada em menos de uma semana.
[c] Dose evitada no primeiro mês.
[d] Dose evitada em um mês subseqüente.
[e] Dose evitada no tempo de vida.
[f] Como as normas não permitem doses acumuladas durante toda vida maiores que 1 Sv, a medida de proteção de reassentamento seria tomada com base na dose projetada de 1 Sv.

5.7.2. Sensibilidade com relação ao custo da medida de proteção

A equação 4.13 mostra que a determinação dos NGI de algumas medidas de proteção depende também de seus custos *per capita*. Elegendo-se o valor estimado de α, 3268 US$.(Sv.pes)$^{-1}$, observa-se na TAB. 5.4, que o NGI para abrigo é de 6 mSv. Estudou-se a robustez deste valor com relação ao custo de abrigo apresentado na TAB. 5.2, de R$ 35,00 *per capita*, isto é, qual o intervalo de valores dos custos de abrigo que faria o NGI variar 10 % em torno do valor estimado.

Utilizando-se a equação 4.13 e adotando-se o valor do dólar americano igual a R$ 1,9546 (Base, 2002), como utilizado na equação 5.1, obteve-se qual deveria ser o valor do custo *per capita* para abrigo, em reais, para que o respectivo NGI fosse 5,4 mSv, isto é, 10 % menor.

$$X = 0{,}0054 \times 3268 \times 1{,}9546 \approx 34{,}50 \text{ R\$.pes}^{-1} \qquad (5.7)$$

Aplicando-se o mesmo raciocínio para que o NGI para abrigo fosse 10 % maior, isto é, 6,6 mSv, temos:

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

$$X = 0{,}0066 \times 3268 \times 1{,}9546 \approx 42{,}20 \text{ R\$.pes}^{-1} \qquad (5.8)$$

Portanto, no intervalo de 34,50 a 42,20 reais para o custo *per capita* de abrigo, o respectivo NGI se mantém estável.

Esta mesma lógica foi aplicada às demais medidas de proteção, e os cálculos foram efetuados fixando-se o valor de 3268 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ para o α, e uma variação de 10 % no NGI, para cima ou para baixo. A exceção foi o NGI para reassentamento, cuja variação adotada foi de 50 mSv, para mais ou para menos, correspondente ao limite de dose efetiva anual para trabalhador, pois a variação de 10 %, no período de 70 anos adotado para o reassentamento, foi considerada elevada para se estimar a estabilidade do resultado. Os valores extremos dos intervalos encontrados desta forma são mostrados na TAB. 5.5.

Tabela 5.5. Intervalo de custos das medidas de proteção no qual o respectivo NGI estimado permanece estável, para α igual a 3268 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ (ano base 2000).

Medida de proteção	Custo estimado (R$ *per capita*)	Intervalo de custo (R$ *per capita*)
Abrigo	35 [a]	34,50 a 42,20
Evacuação	160 [b]	143 a 178
Relocação temporária	740 [c]	667 a 815
	340 [d]	305 a 372
Reassentamento	8000	7665 a 8304 [e]

[a] Estimado para dois dias de abrigo.
[b] Estimado para uma semana de evacuação.
[c] Estimado para o primeiro mês.
[d] Estimado para qualquer mês subseqüente.
[e] Calculado para uma variação de 50 mSv, para mais ou para menos.

O mesmo raciocínio e cálculos foram feitos para verificar a estabilidade dos NGI, com a variação dos custos *per capita*, quando o valor oficial de α de 10000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ é o considerado. Os resultados assim obtidos são mostrados na TAB. 5.6.

Tabela 5.6. Intervalo de custos das medidas de proteção no qual o respectivo NGI estimado permanece estável, para α igual a 10000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$ (ano base 2000).

Medida de proteção	Custo estimado (R$ *per capita*)	Intervalo de custo (R$ *per capita*)
Abrigo	35 [a]	35 a 43
Evacuação	160 [b]	158 a 193
Relocação temporária	740 [c]	668 a 817
	340 [d]	317 a 387
Reassentamento	8000	7036 a 8991 [e]

[a] Estimado para dois dias de abrigo.
[b] Estimado para uma semana de evacuação.
[c] Estimado para o primeiro mês.
[d] Estimado para qualquer mês subseqüente.
[e] Calculado para uma variação de 50 mSv, para mais ou para menos.

6. DISCUSSÃO

Após um acidente nuclear ou uma emergência radiológica, muitos fatores sociais e econômicos terão que ser levados em consideração pelas autoridades. Neste caso, poder-se-ia chegar à conclusão, em certas situações, que seria necessária a aplicação de diferentes *níveis de intervenção* em circunstâncias similares, o que poderia causar impactos na população e levar à perda de confiança nas medidas protetoras e descrédito nas autoridades. Portanto valores diferentes devem ser considerados com muita reserva e cuidado redobrado.

Interpretações imperfeitas dos princípios de intervenção, como a utilização dos limites de dose para indivíduos do público como *níveis de ação*, podem levar a adoção de medidas de proteção desproporcionais ao risco envolvido, comprometendo, até mesmo, os recursos disponíveis para ações mais eficazes.

A experiência adquirida com os acidentes nucleares e emergências radiológicas ocorridos ao longo do tempo auxiliou no desenvolvimento dos princípios que regem a tomada de decisão para proteção do público. Alguns conceitos que aparentavam ser mais eficientes em teoria, como a recomendação de um intervalo de valores para os NGI e não um valor único, mostraram-se menos eficazes na prática. Esses refinamentos nos conceitos e princípios continuam acontecendo, inclusive nos princípios para estabelecimento dos NGI.

Existem ainda alguns desajustes na utilização dos *níveis de intervenção* como, por exemplo, interpretar o valor do *nível de intervenção* como a dose recebida e não como a dose evitada, porém, o conjunto de idéias que norteia esse processo é bem aceito e demonstram um consenso internacional. Por outro lado, alguns autores consideram que, no cenário brasileiro, não há uma disposição para a aplicação do conceito de intervenção e, como conseqüência, o limite de dose para público, de 1 $mSv.a^{-1}$, é freqüentemente utilizado como *nível de ação* (Fernandes e Franklin, 2002).

Uma vez que os fatores envolvidos na tomada de decisão estão bem identificados, é possível distinguir os que indicam benefícios, tais como os riscos evitados e o restabelecimento da segurança do público, dos que indicam danos, tais como os riscos físicos causados pela medida de proteção, riscos impingidos aos trabalhadores, custo monetário da medida de proteção, ansiedade e ruptura social causadas pela medida de proteção. Uma função de prioridade simples poderia ser atribuída a cada um desses fatores e uma técnica de análise de prioridades com atributos múltiplos poderia ser empregada para se determinar um *nível de intervenção* otimizado (Perez, 1996). Para se efetuar um estudo mais aprofundado das técnicas de ajuda para tomada de decisão usadas na otimização de proteção radiológica, aconselha-se o livro de Stokell *et al.* (1991), ou as publicações da CIPR de números 22 (ICRP, 1973), 37 (ICRP, 1983) e 55 (ICRP, 1990), lidos nesta ordem.

A técnica de análise custo-benefício foi a adotada, pois é uma análise quantitativa e os fatores não quantificáveis são deixados a cargo do tomador de decisão, o que é mais consistente com a proposta de determinar valores genéricos para os *níveis de intervenção*. De qualquer forma, a decisão resultante será a mesma, caso os julgamentos realizados no processo sejam consistentes.

Todas as estimativas de custos de proteção para o Brasil chegaram a valores muito abaixo daqueles que foram utilizados pelo OIEA em seus estudos. Isso se deve ao fato que o OIEA considerou os custos médios dos países mais desenvolvidos e as diferenças nos valores econômicos e sociais se sobressaem quando se analisam custos de materiais e serviços. Isto também se reflete quando se comparam os produtos internos brutos.

Observando-se de modo geral, os NGI estimados para o trabalho, não se diferenciam muito dos recomendados pelo OIEA, apesar de alguns dos custos de proteção estimados para as medidas de proteção diferirem em duas ordens de grandeza com relação àquelas consideradas pelo OIEA. Isso se deve, em parte, ao fato dos custos de proteção estarem de alguma forma ligados ao produto interno bruto do país, de forma que os fatores acabam se compensando, fazendo com que os *níveis de intervenção* sejam pouco sensíveis a essas diferenças

econômicas entre países. Para comparação, há um trabalho que estimou os NGI para o Japão de algumas das medidas de proteção (Wang e Nakashima, 2000). A metodologia utilizada naquele trabalho é a mesma recomendada pelo OIEA (IAEA, 1994), porém o valor de α, foi calculado na base de 3749240 ¥.(Sv.pes)$^{-1}$, equivalente a 25000 US$.(Sv.pes)$^{-1}$, foi estimado com base nos dados econômicos japoneses de 1990 e os custos das medidas de proteção foram estimados para valores de 1994. Na TAB. 6.1 são mostrados os valores dos NGI estimados para o Brasil, obtidos para nosso trabalho, os obtidos por Wang e Nakashima para o Japão, e os recomendados pelo OIEA (IAEA, 1994).

Tabela 6.1. Níveis genéricos de intervenção estimados para o Brasil, para o Japão (Wang e Nakashima, 2000) e os recomendados pelo OIEA (IAEA, 1994).

Medida de proteção	NGI Brasil [a] (mSv)	NGI Japão [b] (mSv)	NGI OIEA [c] (mSv)
Abrigo	6 [d]	5 [d]	10 [d]
Evacuação	25 [e]	23,4 [e]	50 [e]
Relocação temporária	116 [f]	22,1 [f]	30 [f]
	53 [g]	*	10 [g]
Reassentamento	1250 [h,i]	878 [h]	1000 [h]

[a] Níveis genéricos de intervenção estimados pelo nosso trabalho para o Brasil, ano base 2000.
[b] Níveis genéricos de intervenção estimados para o Japão (Wang e Nakashima, 2000), ano base 1994.
[c] Níveis genéricos de intervenção recomendados pelo OIEA (IAEA, 1994).
[d] Dose evitada em menos de dois dias.
[e] Dose evitada em menos de uma semana.
[f] Dose evitada no primeiro mês.
[g] Dose evitada em um mês subseqüente.
[h] Dose evitada no tempo de vida.
[i] O valor calculado foi 1250 mSv, mas como as normas não permitem doses acumuladas durante toda vida maiores que 1 Sv, a medida de proteção de reassentamento seria tomada com base na dose projetada de 1 Sv.
* Valor não estimado.

O fato dos *níveis de intervenção* serem relativamente estáveis, quando se passa de uma economia para outra, denota que o valor de α reflete a "disposição para pagar", da população, para obter um grau de proteção maior.

Para se conhecer a evolução do valor real de α no nosso país, desde 1970, e uma projeção até o ano de 2025, aconselha-se consultar o trabalho de Sahyun e Sordi (2000), que fornece estimativas baseadas em três correntes econômicas distintas, uma realista, outra de instituição governamental e uma terceira otimista.

Os NGI aqui estudados foram determinados considerando-se que a população afetada vive em uma área residencial, isto é, não está em uma área altamente industrializada ou no campo, onde há produção agrícola ou pecuária intensa. Alguns autores mostraram que os *níveis de intervenção* para evacuação e relocação temporária, em áreas altamente industrializadas, podem ser maiores, do ponto de vista de risco geral e do econômico, do que aqueles determinados para áreas residenciais, mantendo-se o vínculo de que efeitos determinísticos graves devem ser evitados (Pauwels *et al.*, 1999). Nesse mesmo trabalho, os autores argumentam que as durações otimizadas dessas medidas de proteção seriam menores nesse tipo de área. O mesmo argumento seria válido para abrigo, caso esta medida de proteção exigisse o encerramento dos processos de produção em andamento.

Analisando-se mais profundamente os resultados obtidos para os *níveis de intervenção*, observa-se que os NGI para abrigo e evacuação apresentam-se menores que os valores recomendados pelo OIEA, enquanto que os NGI para relocação temporária e reassentamento são maiores. Os fatores que levam a essa diferença são os custos relacionados à moradia, tanto o valor do aluguel, quanto o de construção de casas. Isto pode ser reflexo do fato que, para o brasileiro, o custo de moradia é relativamente maior que para o indivíduo de países mais desenvolvidos. É provável que, quando o custo relativo de moradia no país for reduzido, os NGI para relocação e reassentamento aproximem-se mais daqueles recomendados pelo OIEA.

O valor de α utilizado pelo OIEA para determinar os níveis genéricos de intervenção recomendados é maior que o valor de α adotado oficialmente pelo Brasil. Por outro lado, as incertezas associadas aos coeficientes de risco para os

efeitos da radiação, fazem o OIEA considerar um intervalo de valores de α cujo extremo inferior coincide com o α oficial.

O estudo de sensibilidade mostrou que, utilizando-se o valor oficial de α, que é cerca de três vezes maior que o α estimado, os valores de NGI para abrigo e evacuação diminuíram, distanciando-se ainda mais daqueles recomendados pelo OIEA. Como o abrigo e a evacuação são medidas de proteção urgentes, essa diferença teria impacto em uma situação de acidente, pois levaria à adoção das medidas protetoras em uma área maior. Nesses casos, devem ser realizadas análises específicas para a situação real mais detalhadamente.

Os NGI para relocação temporária também diminuíram, porém os distanciamentos com relação aos valores recomendados pelo OIEA também diminuíram. Isto pode ser por causa de uma compensação dos custos de aluguel no país por uma maior disposição para pagar pela proteção, representado pelo maior valor de α.

O estudo de sensibilidade mostrou ainda que, uma variação da ordem de 20 % nos custos *per capita* das medidas de proteção, acarreta em uma variação da ordem de 10 % no respectivo NGI. Esses resultados são importantes pois, em uma situação real, uma pequena diminuição no nível de intervenção, leva a adoção da respectiva medida de proteção a uma área maior, aumentando proporcionalmente a quantidade de pessoas a ser protegida, o que pode elevar exponencialmente o custo total da intervenção. Conhecendo a sensibilidade do NGI para os fatores a partir dos quais o mesmo foi determinado, o tomador de decisão pode avaliar a robustez do valor e considerar seu peso com mais propriedade em sua decisão.

7. CONCLUSÕES

Os valores dos *níveis genéricos de intervenção,* obtidos considerando-se custos realistas das medidas de proteção e o valor de α que reflete a situação econômica do país, são diferentes daqueles recomendados pelo OIEA.

Utilizando-se dados econômicos reais de nosso país, e aplicando-se a metodologia para estimar o α recomendada pelo OIEA, encontra-se um valor significativamente menor que o oficial.

Os custos das medidas de proteção estimados para o Brasil foram todos menores que os valores considerados típicos para países desenvolvidos estimados pelo OIEA.

Utilizando-se o valor de α estimado com os valores econômicos reais, os níveis de intervenção obtidos foram mais próximos aos recomendados pelo OIEA do que utilizando-se o valor de α oficial, sendo que os relacionados ao abrigo, evacuação e reassentamento foram os que mais se aproximaram.

A utilização do α oficial para se estimar os níveis genéricos de intervenção levou à obtenção de valores numéricos menores. A aplicação desses valores levaria a introdução da medida protetora a uma área maior e, conseqüentemente, sobre uma população mais numerosa.

O estudo de sensibilidade com a variação do valor α mostrou que os NGI são bastante sensíveis às suas variações.

8. SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS

- Efetuar os estudos de sensibilidade com relação aos custos das medidas de proteção consideradas neste trabalho para os outros valores de α da TAB. 5.4.

- Efetuar um estudo global de sensibilidade de maneira contínua. Neste trabalho foi coberto um intervalo de valores condizente, mas com valores discretos.

- Efetuar um estudo de sensibilidade, envolvendo os fatores que influíram nos custos totais das diferentes medidas de proteção.

- A partir dos NGI calculados neste trabalho, e utilizando os procedimentos recomendados pelo OIEA (IAEA, 1986), chegar aos *níveis derivados de intervenção* para aplicação no controle de doses de radiação no público no evento de um acidente nuclear ou emergência radiológica. Os *níveis derivados de intervenção* são valores mais prontamente comparáveis com os resultados dos monitoramentos, como taxas de dose, valores de concentrações de atividade e valores de densidade de contaminação de superfície.

- Efetuar o mesmo trabalho, porém, considerando também variáveis intangíveis (qualitativas). Para tanto, dever-se-á fazer uso de técnicas de ajuda para tomada de decisão mais complexas do que a análise custo-benefício, como a técnica de análise de prioridade com atributos múltiplos, ou a análise de critérios múltiplos excedentes, mostradas em publicação da CIPR (ICRP, 1990).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 BASE de Dados Macroeconômicos: banco de dados preparado pela Diretoria de Estudos Macroeconômicos. In: INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. 2002. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br>. Acesso em: 10 nov. 2002.

2 BRASIL. Decreto-lei n°. 399, de 30 de abril de 1938. Aprova o regulamento para execução da lei n°. 185, de 14 de janeiro de 1936, que institui as Comissões de Salário Mínimo. Disponível em: <http://wwwt.senado.gov.br/servlets/NJUR.Filtro?tipo=DEL&secao=NJUILEGBRAS&numLei=000399&data=19380430&pathServer=www1/netacgi/nph-brs.exe&seq=000>. Acesso em: 10 nov. 2002.

3 BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. **The International System of Units (SI)**. 7 ed. Serves: BIPM, 1998.

4 CESTA Básica Nacional: banco de dados preparado pelo Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio-Econômicos. In: DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SÓCIO-ECONÔMICOS. 2001. Disponível em: <http://www.dieese.org.br/rel/rac/racjan01.html>. Acesso em: 10 nov. 2002.

5 CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. **Food Import and Export Inspection and Certification Systems**. Rome: FAO/WHO, 2000.

6 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Radioproteção.** Rio de Janeiro, 1988, (CNEN-NE-3.01).

7 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Plano de Emergência Setorial para Reatores de Potência.** Rev. 4. Rio de Janeiro, 1997.

8 CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Resolução n°. 12, de 12 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.profwillian.com/mecsolidos/rconmetro.htm>. Acesso em: 10 nov. 2002.

9 CONTAS Nacionais do Brasil: banco de dados preparado pelo Departamento de Contas Nacionais da Diretoria de Pesquisas. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2002. Disponível em: <http://www1.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasnacionais/tabela5.shtm>. Acesso em: 10 nov. 2002.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN

10 EMMERSON, B. W. The Development of Intervention Levels for the Protection of the Public in the Event of a Major Nuclear Accident – Past, Present and Future. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION PROTECTION IN NUCLEAR ENERGY, Apr. 18-22, 1988, Sydney. **Proceedings...** Vienna: IAEA, IAEA-CN-51/85, 1988.

11 ESTATÍSTICAS do Transporte Urbano: banco de dados preparado pela Gerência Técnica – NTU. In: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. 2000. Disponível em: <http://www.ntu.org.br/banco/estatisticas/custo_igp.htm>. Acesso em: 10 nov. 2002.

12 FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. On the Need of Incorporating the Intervention Concept in the Brazilian Radiological Protection Regulatory Framework. In: 13° ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DE REATORES E TERMOHIDRÁULICA. Agosto 11-16, 2002. Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.

13 HEDEMANN-JENSEN, P. **Intervention Levels for Protective Measures in Nuclear Accidents - International Intervention Policy and Nordic Status on Intervention**. Roskilde, Denmark: Riso, 1992.

14 HEDEMANN-JENSEN, P. International Harmonization of Intervention Levels. In: NORDIC SEMINAR ON EMERGENCY PREPAREDNESS IN NUCLEAR ACCIDENTS, May 4-6, 1994, Oslo, Norway. **Proceedings...** Oslo: NKS, 1994.

15 HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

16 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)**. Dez. 2000. Disponível em: <http://www2.ibge.gov.br/pub/Precos_Custos_e_Indices_da_Construcao_Civil/Fasciculo_Indicadores_IBGE/12_2000.zip>. Acesso em: 10 nov. 2002.

17 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic Safety Standards for Radiation Protection.** Vienna, 1982, (Safety Series No. 9).

18 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Assigning a Value to Transboundary Radiation Exposure.** Vienna, 1985a, (Safety Series No. 67).

19 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Principles for Establishing Intervention Levels for the Protection of the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency**. Vienna, 1985b, (Safety Series No. 72).

20 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Derived Intervention Levels for Application in Controlling Radiation Doses to the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency**. Vienna, 1986, (Safety Series No. 81).

21 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The Radiological Accident in Goiânia**. Vienna, 1988.

22 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Generic Intervention Levels for the Protecting the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency.** Vienna, 1993, (TECDOC No. 698).

23 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency.** Vienna, 1994, (Safety Series No. 109).

24 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources.** Vienna, 1997, (Safety Series No. 115).

25 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency.** Vienna, 2002, (GS-R-2).

26 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Oxford, Pergamon, 1966, (ICRP Publication No. 9).

27 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Implications of Commission Recommendations that Doses be kept as Low as Readily Achievable.** Oxford, Pergamon, 1973, (ICRP Publication No. 22).

28 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Annals of ICRP 1, Oxford, Pergamon, 1977, (ICRP Publication No. 26).

29 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Cost-benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection.** Annals of ICRP 10 (2/3), Oxford, Pergamon, 1983, (ICRP Publication No. 37).

30 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Protection of the Public in the Event of Major Radiation Accidents**: Principles for Planning. Oxford, Pergamon, 1984, (ICRP Publication No. 40).

31 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and Decision-making in Radiological Protection.** Annals of ICRP 20 (1), Oxford, Pergamon, 1990, (ICRP Publication No. 55).

32 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Oxford, Pergamon, 1991, (ICRP Publication No. 60).

33 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework**. Oxford, Pergamon, 1993, (ICRP Publication No. 64).

34 MARIANO, J. B. **Impactos Ambientais do Refino do Petróleo**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

35 MARTINIUSSEN, E. **Sellafield** – Reprocessing Plant in Great-Britain. Washington, DC: Bellona, 2001. cap. 4, earlier discharges. p. 23-34. Disponível em: <http://www.bellona.com/en/energy/nuclear/sellafield/wp_5-2001/index.html>. Acesso em: 13 jan. 2003.

36 MÉTIVIER, H. **Chernobyl** – Assessment of Radiological and Health Impacts. Paris: OECD, 2002. cap. 2, The Release, Dispersion, Deposition and Behaviour of Radionuclides. p. 33-52. Disponível em: <http://www.nea.fr/html/rp/chernobyl/welcome.html>. Acesso em: 21 jan. 2003.

37 NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (EUA). Fact Sheet on the Accident at Three Mile Island. Disponível em: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>. Acesso em: 19 dez. 2002.

38 OLIVEIRA, R. A. **280 Erros Comuns na Tradução da Língua Inglesa** - Termos cujas traduções não são o que parecem. São Paulo: Edicta, 2002.

39 PAUWELS, N.; HARDEMAN, F.; SOUDAN, K. Radiological Protective Measures in Highly Industrialized Areas: Do the Existing Intervention Levels Apply? **Health Phys.**, v. 77, n. 6, p. 646-653, 1999.

40 PEREZ, C. F. A. **Otimização em Radioproteção**. 1996. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

41 PESQUISA de Orçamentos Familiares: banco de dados preparado pelo Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio-Econômicos. In: DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SÓCIO-ECONÔMICOS. 1996. Disponível em: <http://www.dieese.org.br/pof/pof.html>. Acesso em: 10 nov. 2002.

42 PESQUISA de Valores de Locação Residencial da Cidade de São Paulo: banco de dados preparado pelo SECOVI-SP. In: SINDICATO DAS EMPRESAS DE COMPRA, VENDA, LOCAÇÃO E ADMINISTRAÇÃO DE IMÓVEIS RESIDENCIAIS E COMERCIAIS DE SÃO PAULO. Jan. 2001. Disponível em: <http://www.secovi.com.br/pesquisas/locacao/tepesloc0101.htm>. Acesso em: 10 nov. 2002.

43 SAHYUN, A.; SORDI, G. M. A. A. The Evaluation of the Real Alpha Value in Brazil and its Projection until the Year 2025. In: 10th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION. May 14-19, 2000. Hiroshima, Japan. **Proceedings...** Hiroshima: IRPA, 2000. 1 CD-ROM.

44 SORDI, G. M. A. A. Equations Proposal to Determine Risk Limits for Workers and Public Individual. In: 10th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION. May 14-19, 2000. Hiroshima, Japan. **Proceedings...** Hiroshima: IRPA, 2000. 1 CD-ROM.

45 STOKELL, P. J.; CROFT, J. R.; LOCHARD, J.; LOMBARD, J. **ALARA: From Theory Towards Practice**. Luxembourg: CEC, 1991. (Radiation protection series, EUR 13796).

46 WANG, H.; NAKASHIMA, Y. Estimation of Site Specific Intervention Levels and Decision-making on Protective Measures at Radiological Emergencies. In: 10th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION. May 14-19, 2000. Hiroshima, Japan. **Proceedings...** Hiroshima: IRPA, 2000. 1 CD-ROM.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP-IPEN