INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**CONTRIBUIÇÃO PARA INFORMATIZAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA INSTALAÇÕES RADIATIVAS**

DENISE SAHYUN LEVY

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

Orientador:

Doutor Gian Maria Agostino Angelo Sordi

SÃO PAULO

2012

DEDICATÓRIA

Ao meu marido Patrick, grande amor da minha vida, sempre ao meu lado em todos os momentos, apoiando incondicionalmente minhas decisões, me incentivando nos momentos de dúvida e me ajudando na difícil tarefa de conciliar a vida pessoal, profissional e acadêmica.

À querida Adelia, tia e amiga, que nos últimos 20 anos tem me acompanhado, enriquecendo minha vida pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade.

Ao meu orientador, Doutor Gian Maria Agostino Angelo Sordi, com o qual tive o prazer e a honra de trabalhar, eu devo mais que um agradecimento. Agradeço a disponibilidade e o empenho na orientação deste trabalho. Agradeço o apoio constante, a confiança em mim depositada e o exemplo de ética e princípios em todos os momentos.

À Doutora Linda Viola Ehlin Caldas, pelo incentivo pessoal.

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

Aos amigos do IPEN que me acompanharam e me incentivaram a vencer os desafios ao longo deste percurso.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho pudesse tornar-se realidade.

CONTRIBUIÇÃO PARA INFORMATIZAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA INSTALAÇÕES RADIATIVAS

Denise Sahyun Levy

RESUMO

Para elaborar um programa de proteção radiológica, as instalações radiativas brasileiras devem considerar normas, diretrizes e recomendações nacionais e internacionais que encontram-se em documentos de diferentes organizações publicados nas últimas décadas: Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR), Organismo Internacional de Energia Atômica (OIEA) e Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Visando a proporcionar a essas instalações o acesso às informações pertinentes de forma rápida, integrada e eficiente, este projeto propõe informatizar e disponibilizar em um só documento os programas de otimização da proteção radiológica unificados, inter-relacionados e em português, fornecendo ao público usuário um veículo completo para fins de pesquisa, consulta e informação. A partir do discernimento do que deve conter cada programa e seu real dimensionamento, foi trabalhado o inter-relacionamento das informações de maneira a satisfazer as normas e recomendações nacionais e internacionais. O projeto inclui conceitos, definições e teoria necessários, além da pesquisa detalhada do conteúdo do programa de otimização, das técnicas de ajuda para tomada de decisão, das doses de radiação e detrimento e das informações relacionadas aos custos de proteção. O conteúdo permite responder a todas as questões que devem ser colocadas na elaboração de um programa de otimização de forma a possibilitar montagem do plano de Proteção Radiológica conforme a situação específica do usuário. Para a informatização dos programas de otimização foram estudadas as possibilidades de acesso à Tecnologia da Informação e Comunicação nas empresas brasileiras, possibilitando identificar o perfil de utilização do sistema e definir a estrutura funcional adequada para a criação das melhores interfaces de ferramentas e recursos, bem como de um projeto de navegabilidade eficaz facilitando a busca de informações. O poder de processamento dos servidores aliado à tecnologia dos bancos de dados relacionais permite correlacionar informações advindas de diferentes fontes, possibilitando consultas complexas com tempo de resposta reduzido. O sistema segue o padrão WEB 2.0, que possibilita a estrutura organizacional necessária para a adequada informatização da proteção radiológica e considera os corretos critérios de indexação da informação para garantir seu reconhecimento pelos motores de busca da internet. O projeto conta com a combinação de várias tecnologias, potencializando os recursos disponíveis em cada uma delas para alcançar os objetivos propostos. Este trabalho experimental lança um cerne inicial para a informatização dos programas de proteção radiológica, informatizando inicialmente os programas de otimização. A investigação do perfil de utilização durante um período de cinco meses possibilitou o levantamento de dados importantes que apontam novas possibilidades para o desenvolvimento da informatização dos programas de proteção radiológica. Pretende-se, a partir dos resultados deste projeto, aprofundar o trabalho de investigação e completar a execução do sistema de informatização.

CONTRIBUTION TO THE INFORMATIZATION OF RADIATION PROTECTION PROGRAMS FOR NUCLEAR FACILITIES OTHER THAN NUCLEAR FUEL CYCLE

Denise Sahyun Levy

ABSTRACT

In order to establish a Radiation Protection Plan or a Radiation Emergency Plan, Brazilian facilities should take into account all procedures based on both national and international standards, guidelines and recommendations. This information can be found in several documents published by different organizations over the past decades, namely: the International Commission on Radiological Protection (ICRP), International Atomic Energy Agency (IAEA) and Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). This project aims the informatization of the radiological protection optimization programs in a single system in order to offer unified programs and inter-related information in Portuguese, providing Brazilian radioactive facilities a complete repository for research, consultation and information. In order to meet both national and international recommendations within the scope of this work, we conducted a comprehensive job of perception about each program contents as well as its real dimension, identifying and detailing the vital parts of programs. The content includes concepts, definitions and theory in addition to the optimization programs, help decision making techniques, information related to protection costs, radiation doses and detriment. The content allows to answer to every question when an optimization program is elaborated, according to decision maker's specific situation. For dimensioning the work of informatization and developing the WEB platform according to the needs of the target public profile, we have conducted an extensive research regarding the possibilities of Information and Communication Technology access in companies throughout the country. That allowed us to define the best interfaces tools and resources. The servers processing power added to the technology of relational databases allow to integrate information from different sources, enabling complex queries with reduced response time. The project was implemented in a web environment, using the Web 2.0 tools and resources that allow the entire organizational structure, that would enable the inter-relationships and joints needed for proper use of information technology in radiological protection. The correct indexing of contents guarantees that search engines will find the desired information in the shortest time possible. This project uses the combination of multiple technologies, maximizing the resources available in each one of them in order to achieve our goals. For now we intend to begin an initial core working only the optimization program, which in the near future could be extended to other fields of radiological protection. The investigation of the usage profile for five months enabled important data that suggest new possibilities for the development of computerization of radiation protection programs. According to the results of this project, we intend to lead a further research work and complete the informatization system.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Competências da proteção radiológica	13
1.2 Princípios básicos da proteção radiológica	15
1.3 Informatização dos programas de proteção radiológica.....	17
1.4 Justificação do trabalho proposto	19
1.5 Finalidades do presente trabalho	19
1.6 Objetivos do presente trabalho	20
1.7 Partes originais do presente trabalho	21
 2. CONHECIMENTOS TÉCNICOS-CIENTÍFICOS PARA IMPLEMENTAR O TRABALHO.....	22
2.1 Premissas necessárias ao desenvolvimento dos conhecimentos para unificação dos programas de proteção radiológica.....	22
2.2 Resumo das técnicas de ajuda para tomada de decisão utilizadas em proteção radiológica	23
2.2.1. Análise custo-eficácia	27
2.2.2. Análise custo-benefício integral	27
2.2.3. Análise custo-benefício diferencial.....	27
2.2.4. Análise custo-benefício expandida	28
2.2.5. Análise de prioridades com atributos múltiplos	28
2.2.6. Análise de critérios múltiplos excedentes	30
2.3 Técnicas e ferramentas necessárias para a informatização dos programas de proteção radiológica	31
 3. METODOLOGIA UTILIZADA NO DESENVOLVIMENTO DO PRESENTE TRABALHO	34
3.1 Desenvolvimento do conteúdo	34
3.1.1 Unificação, inter-relacionamento e informatização dos programas de otimização	35
3.1.2 Simuladores com componentes interativos virtuais para as técnicas de ajuda para tomada de decisão	38
3.2 Monitoramento do perfil de utilização do sistema: análise dos dados de acesso	39
3.2.1 Integração com <i>Google Analytics</i> e relatórios internos.....	39
3.2.2 Inteligência do sistema de atualização	39

4. RESULTADOS, DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	41
4.1 Dos programas de otimização da proteção radiológica	41
4.1.1. Princípios de Radioproteção	41
4.1.2. Otimização da Proteção Radiológica	42
4.1.3. Características do processo	44
4.2. Do programa de informatização	45
4.2.1 Integração com <i>Google Analytics</i>	47
4.2.2 Relatórios internos	51
4.3. Aportes deste trabalho frente ao cenário mundial	52
 5. TRABALHOS FUTUROS	 54
 ANEXO	 55
 1. PRINCÍPIOS DA RADIOPROTEÇÃO	 56
1.1. Implicações das recomendações da CIPR 22	56
1.1.1. Efeitos biológicos da radiação	56
1.1.2. Surgimento dos princípios básicos da radioproteção.....	58
1.1.3. Introdução às grandezas Detrimento e Dose Coletiva	59
1.1.4. Discussão do parágrafo 47 da publicação da CIPR nº 9 de 1966, itens a e b	60
1.1.5. Estimativa do custo do detrimento	61
1.1.6. Cálculo simplificado do Valor Alfa pela CIPR.....	63
1.1.7. Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas.....	63
1.2. Estimativas do Valor Alfa	66
1.2.1. Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR.....	66
1.2.2. Probabilidade do efeito: principais propósitos para definir o detrimento e recomendações da CIPR	66
1.2.3. Principais métodos para o cálculo do custo atribuído ao detrimento da saúde	67
1.2.4. Abordagem do Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA	68
1.2.5. Abordagem da Junta Nacional de Radioproteção (National Radiation Protection Board) da Inglaterra	69
1.2.6. Abordagem do Centro de Estudos sobre a Avaliação da Proteção no Domínio Nuclear (Centre d'Études sur L'Évaluation de La Protection dans le Domain Nucléaire) da França	69
1.2.7. Exemplos de Valores monetários usados para a dose coletiva unitária.....	69

1.3. Novos Estudos Sobre o Valor Alfa	73
1.3.1. O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica.....	73
1.3.2. O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Exemplo da pequena mina utilizada na publicação 55 da CIPR.....	74
1.3.3. O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Aumento do valor alfa em função da geometria da blindagem	75
1.3.4. Análise de sensibilidade: Argumento da linearidade entre as diferentes opções de proteção radiológica.....	75
1.3.5. Otimização da proteção radiológica usando derivadas.....	77
1.3.6. Mudança de filosofia para o critério alfa: função variável baseada na dose individual máxima	77
 2. OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	80
2.1. Otimização e Tomada de Decisão em Proteção Radiológica	80
2.1.1. Introdução.....	80
2.1.2. Opção de proteção	80
2.1.3. Técnica de ajuda para tomada de decisão: custo-benefício.....	81
2.1.4. Procedimento de otimização de Proteção Radiológica aplicado ao projeto e à operação.....	82
2.2. Técnicas de Ajuda Para Tomada de Decisão.....	83
2.2.1. Exemplo da pequena mina de urânio	83
2.2.2. Análise custo-eficácia	87
2.2.3. Análise custo-benefício integral	89
2.2.4. Análise custo-benefício diferencial.....	91
2.2.5. Análise custo-benefício expandida.....	92
2.2.6. Análise de prioridades com atributos múltiplos	94
2.2.7. Análise de critérios múltiplos excedentes	103
2.2.8. Escolha da técnica de ajuda para tomada de decisão	107
2.3. Outras Considerações Sobre Esforços de Proteção	108
2.3.1. Custos dos esforços de proteção.....	108
2.3.2. Distribuição da dose no tempo	109
2.3.3. Outros fatores de proteção radiológica para o processo de otimização.....	111
2.3.4. Aplicação do procedimento de otimização da proteção radiológica	112
2.3.5. Responsabilidades gerais das autoridades competentes (Publicação 55 - CIPR)	113

3. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	115
3.1. Processo de Otimização da Proteção Radiológica	115
3.1.1. Exigência básica do sistema de proteção radiológica.....	115
3.1.2. Considerações sobre o processo de otimização.....	115
3.1.3. Otimização da proteção radiológica	116
3.1.4. Referências utilizadas no processo de otimização	117
3.1.5. Passos a serem seguidos para um procedimento de otimização.....	117
3.1.6. Revisões regulares da situação de exposição global	119
3.1.7. Dose coletiva	120
3.1.8. Decisões relacionadas à proteção	121
3.1.9. Diferentes passos a serem executados em um estudo de otimização.....	122
3.1.10. Avaliação da situação de exposição.....	123
3.2. Características do Processo e Construção do Projeto	124
3.2.1. Principais características de um processo de otimização de proteção radiológica	124
3.2.2. Principais indicadores	125
3.2.3. Otimização para situações normais, existentes e de emergência	125
3.2.4. Revisões planejadas e alimentação do processo	126
3.2.5. Implantação eficaz da otimização	126
3.2.6. Estádio do projeto	127
3.2.7. Participação dos interessados e principais atributos	128
3.3. Envolvimento dos Interessados	129
3.3.1. Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR	129
3.3.2. Consciência por parte dos trabalhadores	130
3.3.3. Dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização	130
3.3.4. Responsabilidade da decisão final.....	131
3.4. Avaliação e Análise das Tarefas Específicas	131
3.4.1. Avaliação prévia das tarefas a serem realizadas	131
3.4.2. Ordem detalhada dos passos de uma tarefa de otimização.....	132
3.4.3. Como obter os dados necessários ao processo de otimização da proteção radiológica	133
3.4.4. Distribuição da exposição à radiação ionizante nas atividades humanas	135
3.4.5. Distribuições da exposição à radiação ionizante no tempo e no espaço	135
3.4.6. Matriz de dose coletiva e o processo de tomada de decisão na otimização	137
3.5. Meios Para Reduzir a Exposição à Radiação Ionizante	137

3.5.1. Meios gerais para reduzir a exposição à radiação ionizante	137
3.5.2. Educação geral do trabalhador	138
3.5.3. Consciência e envolvimento dos trabalhadores.....	139
3.5.4. Melhoria na comunicação.....	140
3.5.5. Meios específicos à tarefa para reduzir a exposição à radiação ionizante	141
3.5.6. Redução do tempo de exposição, número de trabalhadores e taxas de dose	143
3.5.7. Treinamento especializado	145
3.6. Definição e implementação de um plano ALARA visando a proteção radiológica	146
3.6.1. Estrutura para um plano ALARA.....	146
3.6.2. Análise e seleção de opções de trabalho específicas para a redução das doses à radiação ionizante	146
3.6.3. Principais indicadores da eficácia do monitoramento de um plano ALARA.....	147
3.6.4. Aplicação da otimização em operações envolvendo radiações ionizantes e em regulamentos.....	148
3.6.5. Valor monetário da dose coletiva unitária: valor alfa	149
REFERÊNCIAS.....	152

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Valor monetário de 1 Sv-pessoa recomendado por diferentes autoridades.....	70
TABELA 2 - Valor monetário de 1 Sv-pessoa para diferentes Instalações (valores singulares) ...	71
TABELA 3 - Valor monetário de 1 Sv-pessoa para diferentes instalações baseado na dose individual anual.....	72
TABELA 4: Exemplo da mina de urânio: valores, custos e doses coletivas para cada opção	84
TABELA 5: Características do fluxo de ar para as opções.....	85
TABELA 6: Doses individuais médias dos mineiros em cada grupo - caso base e opções	86
TABELA 7: Custos anuais e doses coletivas anuais associadas para cada opção.....	86
TABELA 8: Resumo das tabelas 5, 6 e 7: dados considerados no exemplo da mina de Urânio ..	87
TABELA 9: Razões de custo-eficácia para as opções consideradas.....	88
TABELA 10: Análise custo-benefício integral para as opções consideradas.....	90
TABELA 11: Doses coletivas e custo do detrimento	93
TABELA 12: Custo total (X+Y).....	93
TABELA 13: Prioridades parciais e totais com crescimento para cada opção	99
TABELA 14: Análise de prioridades parciais e totais - análise custo-benefício expandida	101
TABELA 15: Prioridades parciais - análise de prioridades com atributos múltiplos	102
TABELA 16: Análise de prioridades com atributos múltiplos em seu próprio contexto	102
TABELA 17: Fatores da análise de prioridades com atributos múltiplos	105
TABELA 18: Análise de prioridades com atributos múltiplos - indicadores de vantagem	105
TABELA 19: Critério de exclusão - fator desconforto provocado pela ventilação	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: UNIPRORAD - Relatório geral de acesso (26/06/2012)	47
Figura 2: UNIPRORAD - Relatório geral de acesso (27/07/2012)	48
Figura 3: UNIPRORAD - Relatório de informações demográficas (27/07/2012)	49
Figura 4: UNIPRORAD - Relatório sobre navegador e sistema operacional (27/07/2012)	50
Figura 5: Possibilidades dos efeitos biológicos estocásticos da radiação ionizante	57
Figura 6: Gráfico do custo-benefício	62
Figura 7 - Curva custo-eficácia com a linha unindo as 5 opções custo-efetivas.....	88
Figura 8: Curva custo-benefício para as opções consideradas no exemplo da mina de urânio..	89
Figura 9: Função de prioridade parcial para o custo no exemplo da mina de urânio	98
Figura 10: Distribuição da dose coletiva para diferentes grupos	136

1. INTRODUÇÃO

1.1 Competências da proteção radiológica [1]

A proteção radiológica pode ser definida como a ciência que tem por objetivo oferecer proteção aos indivíduos e ao meio ambiente contra os efeitos nocivos à saúde provocados pela radiação ionizante. Uma vez que o indivíduo interage com o seu meio ambiente, acredita-se que se for oferecida proteção suficiente à pessoa, também o ambiente estará protegido.

A proteção radiológica envolve dois grupos de indivíduos distintos: a proteção ao trabalhador, aquele cuja atuação profissional envolve a radiação ionizante e contato com materiais radioativos, e a proteção ao público, que vive próximo a instalações radiativas e que pode vir a sofrer os efeitos da radiação, seja por vazamento dela através das blindagens, seja por liberação do material no ambiente. Para este último, é considerada a pessoa representativa, isto é, aquela pessoa ou grupo que recebe a maior dose.

A radioproteção ocupacional visa manter as condições de trabalho seguras e satisfatórias e considera que são três os meios disponíveis para a proteção do trabalhador ou a combinação deles:

- O tempo: quanto maior o tempo em presença das radiações maior a dose recebida pelo trabalhador.
- A distância: levando-se em consideração que a dose é inversamente proporcional ao quadrado da distância, pode-se fazer uso de garras ou outros equipamentos que possibilitem aumentar a distância entre o trabalhador e o material radioativo.
- A blindagem: instalações radiativas e nucleares devem ser auto-blindadas sempre que possível, de acordo com a norma de proteção radiológica. Quando isso não é possível, é admitido o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI).

No que tange a proteção do indivíduo do público ao nível de risco estabelecido, há duas abordagens por meio de sistemas de engenharia, a saber:

- Por blindagem para a fuga da radiação;
- Para controlar a liberação de material radioativo no ambiente. por filtros para gases e vapores ou sistemas de contenção para sólidos e líquidos.

Também fazem parte da proteção ao público o transporte de material radioativo, efetuado por meios públicos pelas mesmas vias e rotas de outros materiais. Com exceção dos empregados da transportadora, considerados trabalhadores, todos os envolvidos no transporte de materiais radioativos são considerados indivíduos do público.

Ainda que as condições de trabalho sejam aceitavelmente seguras e satisfatórias, e os riscos à pessoa representativa seja igual ou inferior aos riscos previstos em sua vida cotidiana, deve-se comprovar que, com o passar do tempo, o sistema implantado continua suficiente e adequado. O monitoramento é um processo contínuo, de caráter preventivo ou confirmatório, que envolve trabalhadores e indivíduos do público. As técnicas de monitoramento permitem

tanto alertar trabalhadores e público a respeito da presença da radiação buscando evitar uma dose excessiva, quanto avaliar doses já recebidas que não puderam ser evitadas.

O monitoramento preventivo é proporcional à dose que se estima que afetará o trabalhador, e portanto, quando a soma das doses é inferior a 1/10 de LAMA (Limite Anual Máximo Admissível), não se justifica o monitoramento e o mesmo deve ser excluído, embora a CNEN, em sua norma 3.01, obrigue o monitoramento. Há três tipos de monitoramento para o trabalhador, que não necessariamente atuam ao mesmo tempo: monitoramento do local de trabalho para radiação externa, monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície e monitoração do local de trabalho para a contaminação do ar. Da mesma forma, os três tipos de monitoramento de caráter confirmatório para o trabalhador serão utilizados de acordo com a sua necessidade de implementação. São eles: monitoramento individual para radiação externa, monitoramento individual para contaminação interna e monitoramento para contaminação de pele e roupa. Quanto ao monitoramento preventivo para o público, busca mensurar a dose na pessoa representativa advinda de vazamentos de radiação ou descarga de materiais radioativos no ambiente. Isso se dá relacionando percentualmente as doses resultantes dos caminhos críticos e os respectivos LAMAs. Nesse caso não são considerados importantes aqueles caminhos cujas doses resultantes são inferiores a 1/10 daquelas fornecidas pelo caminho crítico de maior dose; nesse caso o monitoramento não se justifica. Não é realizado monitoramento individual para indivíduos do público, mas são analisados os diferentes caminhos críticos, e através do monitoramento do ambiente, pode-se avaliar as doses que receberá a pessoa representativa, sejam elas externas, ou seja, decorrentes do aumento do nível de radiação, ou internas, isto é, através da contaminação do ar ou fontes de alimentação.

Os equipamentos para o monitoramento devem ser calibrados segundo padrões de confiabilidade nacionais e internacionais. O grau de incerteza dos monitores individuais – em um grau de confiabilidade de 95% – não devem exceder um fator de 1,5 para níveis de radiação próximos aos LAMAs, e um fator de 2 para níveis anuais inferiores a 10 mSv. Para o monitoramento em geral, os instrumentos podem apresentar erro de até 50% e os dosímetros acidentais (lendo doses em intervalo a partir de 1 mSv a mais de 10 Gy) erro de 25%.

Embora a prioridade da radioproteção seja privilegiar sistemas de proteção que evitem contaminações, quando estas ocorrem, envolvendo trabalhadores e ambiente de trabalho, é necessária uma intervenção de maneira a restabelecer o nível de segurança da instalação que havia antes da ocorrência. Os rejeitos gerados pelos procedimentos de descontaminação raramente podem ser reaproveitados e devem ser adequadamente eliminados por meio de extensivos programas de tratamentos de rejeitos radioativos. Buscando minimizar as contaminações, torna-se imprescindível a formação e treinamento da equipe de operação que, no mais das vezes, pode ser realizado no próprio local de trabalho durante o desenvolvimento das tarefas. Além desses procedimentos, há que se considerar outras atividades que ultrapassam as funções das instalações, como atividades normativas e legislativas perante a prefeitura, estado ou país; atividade de planejamento de emergência junto à defesa civil dos órgãos governamentais; prestação de serviço ao público e atividades de educação à população.

Dentre os múltiplos aspectos que englobam a proteção radiológica, será tratada neste trabalho a questão da otimização.

1.2 Princípios básicos da proteção radiológica

A proteção radiológica deve prestar contas de suas atividades não apenas à direção da empresa na qual executa as tarefas, como também aos órgãos governamentais fiscalizadores competentes e demais interessados. Para fins de prestação de contas, todas as atividades de proteção e segurança à radiação executadas na empresa são descritas em um manual intitulado “Plano de Proteção Radiológica, PPR”, elaborado segundo orientação das autoridades fiscalizadoras competentes e deve ser aprovado por elas. O plano deve atender a três princípios básicos de proteção radiológica [2], a saber:

Princípio da otimização da proteção radiológica, também conhecido como princípio ALARA (As Low As Reasonably Achievable): as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto é racionalmente exequível, considerando os aspectos econômicos e sociais. De acordo com a CIPR (Comissão Internacional de Proteção Radiológica), o respeito aos limites de doses anuais não implica uma proteção radiológica branda. Inicialmente a CIPR recomendou que as doses fossem mantidas tão pequenas quanto possível. Entretanto esse enunciado se mostrou pouco eficaz, uma vez o preço da proteção aumenta exponencialmente com o aumento da proteção e, a partir de determinado valor, o custo não justificaria o benefício. Em virtude disso, o enunciado que havia sido alterado algumas vezes ao longo dos anos, sofreu uma ulterior modificação para: “as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto racionalmente exequível”.

Princípio da justificação: as doses serão justificadas pelos benefícios esperados do procedimento. Este princípio foi introduzido visando eliminar as aplicações da radiação ionizante em atividades que não fornecem um benefício para a população e, portanto, não se justificam. A presença de determinada fonte de radiação deve ser sempre justificada, considerando seus efeitos totais positivos e negativos, bem como avaliar procedimentos alternativos. Considerando os benefícios tangíveis e intangíveis, o benefício líquido deve ser sempre positivo, isto é, superior à soma de todos os aspectos negativos de uma operação.

Princípio de limitação de dose: a qualquer dose, por menor que seja, está associado um risco, isto é, a probabilidade de sofrer um efeito deletério como resultado de uma dose de radiação. Os limites de dose individuais foram estabelecidos no intuito de limitar o aparecimento dos efeitos tardios e de evitar os efeitos de reações do tecido, fixando limites tão pequenos que dificilmente serão atingidos esses efeitos. Os limites de dose anuais não devem exceder os limites recomendados pela CIPR. No que tange os trabalhadores, as doses individuais anuais de corpo inteiro recebidas podem ser divididas em três regiões, a saber: aceitável (doses menores que 5mSv a^{-1}), tolerável (doses entre 5mSv a^{-1} e 50mSv a^{-1}) e inaceitável (doses superiores a 50mSv a^{-1}). Quanto aos indivíduos do público, considera-se uma dose máxima de 1mSv a^{-1} . É fundamental ater-se ao princípio de limitação de dose quando o grupo que recebe o dano não necessariamente é o mesmo que recebe o benefício. Pode-se tomar como exemplo a cidade

do Rio de Janeiro, cuja população é beneficiada pela energia gerada há quilômetros de distância, na usina nuclear de Angra dos Reis.

O princípio da otimização que visa o progressivo decréscimo das doses individuais faz uso das técnicas de ajuda de tomada de decisão que, pela análise custo-benefício e outras, busca obter o benefício máximo de uma operação, obtendo um nível de detrimento suficientemente pequeno de maneira que qualquer redução ulterior na irradiação não justifique o custo requerido para efetuarla, obtendo desta maneira o menor nível de dose racionalmente exequível. Este trabalho pretende informatizar uma parte das atividades de radioproteção que se refere à otimização e à introdução às técnicas de ajuda para tomada de decisão utilizadas para satisfazer o princípio da otimização, ALARA.

Atualmente o Plano de Proteção Radiológica que transcreve os programas de proteção radiológica para as instalações radiativas é manualmente redigido e não se encontra completamente informatizado. O pouco que se encontra na literatura abraça unicamente algumas atividades de proteção radiológica e é muito particularizado à determinada instituição, não existindo até o presente momento nada de caráter geral que possa ser aproveitado por todas as instalações [3]. A informatização pode auxiliar sobremaneira a instalação radiativa que necessita implementar um programa de proteção radiológica que pode ser adequadamente dimensionado, uma vez adaptado à instalação em apreço.

1.3 Informatização dos programas de proteção radiológica

Nos últimos anos o avanço da tecnologia tem propiciado possibilidades nunca antes imaginadas, com o crescimento exponencial da internet, a evolução e a padronização dos browsers¹, a disseminação do computador dentro das empresas, indústrias e corporações como ferramenta de trabalho individual, a evolução técnica das linguagens disponíveis de programação e por fim a consolidação dos padrões de aplicações em formato WEB, onde todos os dados e funcionalidades são armazenados em um servidor, sendo o acesso possível de qualquer parte do mundo. Segundo publicações realizadas pelo Comitê Gestor da Internet no Brasil [4-6] que realizou diversas pesquisas em todos os estados brasileiros, houve um importante avanço no uso das tecnologias de informação nas empresas brasileiras. Ao longo dos últimos anos houve um importante decréscimo no acesso à internet discada e um avanço significativo quanto às redes corporativas internas sem fio, exemplos que demonstram a propensão do mercado empresarial de acompanhar as mais novas tendências tecnológicas no intuito de se beneficiar o mais amplamente possível dos avanços das tecnologias de informação. De acordo com essas pesquisas dentre as atividades predominantemente realizadas por funcionários nas empresas brasileiras, destaca-se em terceiro lugar, a busca de informações e atividades de pesquisa, atividades essas realizadas por 86% das empresas brasileiras [5].

Utilizando o poder de processamento dos servidores aliado à tecnologia dos bancos de dados relacionais que permitirão realizar consultas complexas com tempo de resposta bastante

¹ Browsers são programas computacionais que possibilitam ao público usuário interagir com documentos virtuais da internet. Pode-se citar como exemplo *Internet Explorer*, *Netscape* e *Mozilla*.

reduzido, este trabalho de pesquisa envolve não apenas o estudo da evolução das novas tecnologias como meio de disseminação de informação, como também a pesquisa detalhada do conteúdo dos programas de otimização, de forma a inter-relacionar informações hoje dispersas em várias publicações e documentos, de forma pertinente e consistente.

Em, 1990 o OIEA publicou a árvore de Porfírio mais genérica e completa para um programa de proteção radiológica adequado e eficaz [7]. Conforme esta árvore devem ser minuciosamente desenvolvidos seis campos de atividades e adaptados a cada instalação em função das operações executadas e características das fontes de radiação ionizante utilizadas, para que se possa ter uma dimensão adequada do programa de proteção radiológica. Estas atividades são:

1. Uma organização e gerenciamento comprometidos com a proteção e segurança e com o princípio ALARA, isto é, com a própria otimização.
2. Um sistema de seleção e treinamento bem sucedido do pessoal.
3. Um controle eficaz da irradiação do trabalhador.
4. Um controle eficaz da irradiação do público.
5. Planejamento e preparo eficaz para emergência.
6. Uma garantia da qualidade implementada.

Uma vez que estas atividades obrigatoriamente devem estar otimizadas para satisfazer o segundo princípio básico de proteção radiológica, este trabalho de pesquisa se propõe a lançar um cerne inicial que compreende:

- a informatização através de bancos de dados relacionais e a elaboração de uma ferramenta de pesquisa agregando todas as informações disponibilizadas concernentes à otimização;
- o encadeamento e inter-relacionamento de todas as informações correlatas que tratam da otimização, técnicas de ajuda para tomada de decisão, doses de radiação e detrimento, informações relacionadas aos custos de proteção;
- um trabalho de pesquisa de utilização, para mensurar o potencial da contribuição da informatização da proteção radiológica, cujos dados servirão como ponto de partida para projetos futuros.

Desta maneira, empregamos a metodologia mais moderna da informática ao princípio básico da proteção radiológica referente à sua otimização aplicando as técnicas de otimização conhecidas como técnicas de ajuda para tomada de decisão, estabelecendo os princípios para a escolha mais conveniente de uma determinada técnica de ajuda para a tomada de decisão que se adeque à instalação em apreço.

Pretende-se, por meio das ferramentas da informática auxiliar o público usuário no dimensionamento dos esforços da otimização de modo que eles sejam justificados e eficazes. Uma vez detectada a necessidade do acesso a essas informações de forma rápida, integrada e eficiente, é possível aliar a tecnologia da informática à proteção radiológica de forma a explorar ao máximo os benefícios advindos da informatização. Desta maneira, os programas de otimização unificados e inter-relacionados foram organizados e disponibilizados em português para fins de pesquisa, consulta e informação. Como a inteligência do desenvolvimento do projeto visa atingir múltiplos objetivos e perfis de pesquisa diferenciados,

é necessário o estudo das melhores interfaces de ferramentas e recursos de acordo com estudo de inter-relacionamento e unificação dos programas de proteção radiológica. Desta maneira, foi prevista a Implementação de um projeto piloto para a utilização do público alvo, em ambiente WEB, utilizando-se de ferramentas e recursos WEB 2.0² de acordo com a necessidade de cada objetivo a ser alcançado. A partir das informações de acesso fornecidas pelo projeto piloto, pode-se pesquisar o benefício advindo da informatização da proteção radiológica por meio da análise de dados das informações acessadas, bem como os perfis de acesso a essas informações tanto qualitativamente como quantitativamente. Essas informações tornaram possível o direcionamento de pesquisas para a informatização da tecnologia nuclear, notadamente na proteção radiológica.

1.4 Justificação do trabalho proposto

Como a obediência ao segundo princípio básico de proteção radiológica, isto é o princípio ALARA ou de otimização da proteção radiológica é obrigatória para todos os seis principais tópicos da proteção radiológica e o controle das radiações ionizantes, para todas as instalações radiativas que não foram isentadas ou excluídas, é também imperativo considerar que o início da pesquisa e informatização dever-se-ia dar com respeito a estes dois temas a serem inicialmente informatizados e que fornecem a proposta do presente trabalho. Será desenvolvida de forma inédita uma ferramenta de pesquisa agregando todas as informações importantes concernentes à otimização. Posteriormente será realizado um trabalho de pesquisa de utilização, para mensurar o potencial da contribuição da informatização da proteção radiológica, cujos dados servirão como ponto de partida para projetos futuros.

1.5 Finalidades do presente trabalho

1. Empregar a metodologia mais moderna da informática ao princípio básico da proteção radiológica referente à sua otimização aplicando as técnicas de otimização conhecidas como técnicas de ajuda para tomada de decisão.
2. Estabelecer pela informática os princípios para a escolha mais conveniente de uma determinada técnica de ajuda para a tomada de decisão que se adeque à instalação em apreço.
3. Dimensionar os esforços da otimização pela informática de modo que eles sejam justificados e eficazes.
4. Uma vez detectada a necessidade do acesso a essas informações de forma rápida, integrada e eficiente, aliar a tecnologia da informática à proteção radiológica de forma a explorar ao máximo os benefícios advindos da informatização.

² Web 2.0 foi um termo criado para identificar uma segunda geração de comunidades e serviços na internet envolvendo a Tecnologia da Informação e Comunicação.

5. Disponibilizar em um único documento de forma inédita e completa os programas de otimização unificados, inter-relacionados e em português, para fins de pesquisa, consulta, informação e confecção dos planos de proteção radiológica a serem submetidos à aprovação da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.

6. Implementação de um projeto piloto para a utilização pelo público alvo, em ambiente WEB, utilizando-se de ferramentas e recursos WEB 2.0 de acordo com a necessidade de cada objetivo a ser alcançado. Como a inteligência do desenvolvimento do projeto visa atingir múltiplos objetivos e perfis de pesquisa diferenciados, serão estudadas as melhores interfaces de ferramentas e recursos de acordo com estudo de inter-relacionamento e unificação dos programas de proteção radiológica descritos nos itens 1.6.1 a 1.6.12 do presente trabalho.

7. A partir das informações de acesso fornecidas pelo projeto piloto, pesquisar o benefício advindo da informatização da proteção radiológica. Faz parte do trabalho de pesquisa detectar as informações acessadas, os perfis de acesso a essas informações tanto qualitativamente como quantitativamente, para permitir que o trabalho de informatização se ajuste às necessidades do público usuário.

1.6 Objetivos do presente trabalho

Os objetivos ou metas do presente trabalho para se alcançarem as finalidades propostas em 1.5, obedecerão, na medida do possível a ordem cronológica de seu desenvolvimento, ainda que em alguns casos possam ser superpostos.

1.6.1 Criar um modelo de informatização e justificar a principal terminologia usada na otimização da proteção radiológica que foge da definição de dicionário como noção de risco, dos princípios básicos de proteção radiológica, de detrimento, de dose coletiva, de fatores tangíveis e intangíveis, opção de proteção, custo da opção, desempenho da opção, fator, atributo, critério, entre outros.

1.6.2 Introduzir um modelo estruturado para a otimização de proteção aplicado ao projeto e à operação da instalação radiativa.

1.6.3 Criar um modelo de informatização para o princípio básico da proteção radiológica da justificação e a sua equação matemática.

1.6.4. Desenvolver um modelo de informatização para as técnicas quantitativas para a tomada de decisão, a saber:

- Análise custo-eficácia
- Análise custo-benefício diferencial
- Análise custo-benefício integral
- Análise custo-benefício expandida
- Análise de prioridades com atributos múltiplos
- Análise com critérios múltiplos excedentes

1.6.5. Criar um modelo de informatização para as possíveis estimativas do valor alfa e fornecer exemplos das entidades internacionais e algumas nacionais.

1.6.6. Desenvolver um modelo de informatização para exemplificar os fatores que podem ser quantificados e informatizados além da dose coletiva e do custo de proteção.

1.6.7. Informatizar a metodologia para aplicação do procedimento de otimização tanto para o projeto quanto para a operação de instalação radiativa.

1.6.8. Criar um modelo de informatização para a construção do processo de otimização, considerando suas características, o envolvimento dos interessados e a escolha da melhor opção.

1.6.9. Criar um modelo de informatização para a distribuição das doses no tempo e no espaço introduzindo a matriz de dose coletiva para a tomada de decisão.

1.6.10. Informatizar os procedimentos para a avaliação das situações de exposição com múltiplos exemplos.

1.6.11. Criar um modelo de informatização para os princípios e meios de redução da exposição com múltiplos exemplos.

1.6.12. Desenvolver um modelo de informatização para os componentes globais a serem considerados na definição e implementação de um plano ALARA com vários exemplos.

1.6.13. Utilizar as possibilidades dos bancos de dados relacionais para a disponibilização do conteúdo de maneira a inter-relacionar as informações pertinentes que não se encontram hoje disponibilizadas de forma linear em um mesmo meio de acesso, como por exemplo, leis e normas às quais são submetidos os procedimentos e exigências impostos pelas autoridades locais do país que podem ser mais ou menos restritivos do que as recomendações internacionais.

Ainda que cada objetivo apontado constitua um assunto a ser tratado separadamente, far-se-á um estudo para possibilitar o encadeamento de informações correlatas, de acordo com os assuntos com os quais se relacionam, a saber:

- Itens que se relacionam com a otimização:
estarão inter-relacionados neste grupo todos os itens de 1.6.1 a 1.6.12.
- Itens que se relacionam com as técnicas de ajuda para tomada de decisão:
serão integrados os assuntos dos objetivos 1.6.2, 1.6.3 e 1.6.4
- Itens que se relacionam com as doses de radiação e detrimento:
inter-relacionamento dos itens 1.6.6, 1.6.7, 1.6.8, 1.6.9, 1.6.10, 1.6.11, 1.6.12
- Itens relacionados aos custos de proteção:
integração dos assuntos constantes nos itens 1.6.4, 1.6.5, 1.6.6 e 1.6.7

1.6.14. Trabalhar ao longo do desenvolvimento deste trabalho com o cuidado e a preocupação com a correta indexação dos conteúdos, garantindo de que serão promovidos pelos motores de busca e possibilitando que sejam facilmente encontrados pelo público corporativo.

1.6.15. Utilizar as possibilidades das novas tecnologias de forma a criar bancos de dados com informações sobre o público alvo, quem são e onde estão localizados geograficamente os profissionais que hoje buscam essas informações, o que buscam, quais as informações mais acessadas em determinado espaço de tempo etc.

1.6.16. Publicar em ambiente de produção, alguns meses antes do prazo final para que se possa analisar quantitativamente os perfis de acesso, fornecendo dados quanto à utilização do sistema pela indústria e outras instalações, de forma a analisar o potencial de contribuição pela informatização da proteção radiológica, antevendo possíveis caminhos para a evolução do sistema e direcionando futuras linhas de pesquisa.

1.6.17. Desenvolver um sistema que permita acompanhar posteriormente, qualitativamente e quantitativamente, a evolução desta pesquisa.

1.7 Partes originais do presente trabalho

Durante o desenvolvimento do presente trabalho pretendeu-se, a partir dos conceitos, definições e teoria necessária a completar os 12 primeiros objetivos elencados, efetuar uma ampla pesquisa que possibilitasse disponibilizar em um só documento, de forma inédita e completa, os programas de otimização da proteção radiológica unificados, inter-relacionados e em português, para fins de pesquisa, consulta, informação e confecção dos planos de proteção radiológica. A partir do discernimento do que deve conter cada programa e seu real dimensionamento foram trabalhados o inter-relacionamento das informações, o desenvolvimento de motores de busca de acordo com as diferentes estruturas criadas e seus respectivos critérios de indexação, sendo isso completamente original no campo da proteção radiológica e reflete o ponto de vista da autora da presente dissertação.

Ainda, é completamente original a utilização da tecnologia da informação e comunicação como ferramenta de pesquisa e disseminação do conhecimento no processo de otimização da radioproteção e ainda utilizando-se dessa mesma ferramenta para pesquisa de utilização pelo público final. Esse trabalho de pesquisa possibilitará o levantamento de dados qualitativos e quantitativos do perfil de utilização do sistema que permitirá auxiliar futuras linhas de investigação.

2. CONHECIMENTOS TÉCNICOS-CIENTÍFICOS PARA IMPLEMENTAR O TRABALHO

2.1 Premissas necessárias ao desenvolvimento dos conhecimentos para unificação dos programas de proteção radiológica

Quando uma instalação radiativa elabora o seu programa de proteção radiológica intitulado “Plano de Proteção Radiológica, PPR” ou seu “Plano de Emergência Radiológica, PER”, deve-se levar em consideração todos os procedimentos baseados em normas, diretrizes e recomendações tanto nacionais como internacionais. Essas informações encontram-se em diversos documentos de diferentes organizações publicados ao longo das últimas décadas, a saber: Comissão Internacional de proteção Radiológica (CIPR), Organismo internacional de Energia Atômica (OIEA) e Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). No Brasil as instalações que envolvem a radiação ionizante são divididas em instalações radiativas e instalações nucleares. As instalações nucleares são aquelas que abrangem todo o ciclo do combustível nuclear, desde a mineração dos materiais nucleares, reatores tanto de potência e pesquisa e produção de radioisótopos, até o reprocessamento dos elementos combustíveis dos reatores nucleares. As instalações radiativas são aquelas que se utilizam das radiações ionizantes nas demais aplicações pacíficas da energia nuclear como na indústria, na medicina, na agricultura, na preservação do ambiente etc. Todo o ciclo do combustível nuclear, incluindo os reatores e a produção de radioisótopos, é monopólio governamental, enquanto que as demais atividades humanas envolvendo as radiações ionizantes podem ser desenvolvidas e utilizadas pelo público sob licença e fiscalização do governo, incluindo também a produção de radioisótopos de meia vida muito curta.

A CIPR fornece recomendações visando a proteção do meio ambiente e dos indivíduos aos efeitos maléficos produzidos pela radiação ionizante. Suas recomendações estão alicerçadas nos relatórios do Comitê Científico sobre os Efeitos das Radiações Atômicas das Nações Unidas (CCERANU) e nos relatórios do *Biological Effects of Ionizing Radiations* (BEIR) dos Estados Unidos e são baseadas em uma filosofia de proteção própria. Em suas publicações, a CIPR ainda fornece os motivos que levaram a expor as suas recomendações. Esta entidade atualmente já teve publicados mais de uma centena de relatórios, embora nem todos continuem vigentes. O OIEA, órgão oficial das Nações Unidas (ONU) que congrega os países que se utilizam das radiações ionizantes e que são afiliados a ela, baseando-se nas recomendações da CIPR e sua filosofia, emite as próprias recomendações. Não fornece os motivos que levaram a elas, mas fornece guias para se satisfazer as exigências constantes nas recomendações. Atualmente o OIEA possui mais de duas mil publicações sobre proteção e segurança, mas para a proteção radiológica operacional há a coleção *Safety Series*, com cerca de 150 publicações, nem todas vigentes, a coleção *Technical Report Series* e a série de documentos técnicos conhecidos como *Tec-doc*.

Ainda, cada país afiliado à OIEA emite suas próprias normas e regulamentos, baseados nas recomendações internacionais, pois cada país possui um órgão governamental regulatório em permanente contato com o OIEA. No Brasil, a entidade governamental nacional, ligada ao OIEA e subordinada ao Ministério de Ciência e Tecnologia, é a Comissão Nacional de Energia Nuclear

(CNEN). Esta comissão já emitiu uma série de normas³ e resoluções [3; 8 - 21] para instalações radiativas do país, para que se mantenham em funcionamento programas de proteção radiológica adequados e eficazes, mas não fornece os guias para cumpri-las, como faz o OIEA. Ainda que as Diretrizes Básicas de Proteção [3] em seu artigo 5.3.8 informe a temática que um Plano de Proteção Radiológica deve conter, não se encontra em uma sequência lógica, nem comenta o nível de detalhamento, o que faz com que para instalações radiativas análogas, os planos aprovados possuam descrições diferentes dos programas.

Visando auxiliar a instalação radiativa que necessita implementar um programa de proteção radiológica, o primeiro intuito do processo de informatização é fornecer ao público corporativo um veículo completo que possibilite a pesquisa detalhada no que concerne à otimização, que permita dimensionar os esforços da otimização pela informática de modo que eles sejam justificados e eficazes.

Buscando satisfazer tanto às normas nacionais da CNEN [3] como as recomendações internacionais da CIPR [2; 22 - 24] e do OIEA [25] no que dizem respeito ao assunto deste trabalho, o desenvolvimento deste projeto teve início a partir dos conceitos, definições e teorias necessárias, além da pesquisa detalhada do conteúdo do programa de otimização, de forma a inter-relacionar informações hoje dispersas em várias publicações e documentos, de forma pertinente e consistente. Efetuou-se um amplo trabalho de pesquisa do que deve conter cada programa e seu real dimensionamento, identificando possibilidades de inter-relacionamento das informações, bem como o desenvolvimento de motores de busca de acordo com as diferentes estruturas criadas e seus respectivos critérios de indexação.

Desenvolver a pesquisa e execução do trabalho de informatização do programa de proteção radiológica é tarefa extensa, que implica trabalhar conteúdos complexos através de bancos de dados relacionais, bem como o encadeamento e inter-relacionamento de todas as informações correlatas que tratam da otimização, técnicas de ajuda para tomada de decisão, doses de radiação e detrimento e informações relacionadas aos custos de proteção. Pretende-se nesse momento lançar um cerne inicial, informatizando inicialmente o conteúdo referente à legislação e técnicas concernentes à otimização para que futuramente o trabalho possa ser estendido a outros campos da proteção radiológica, de acordo com a árvore de porfírio positiva publicada pelo OIEA em 1990 [7], sendo essa a árvore mais genérica e completa para um programa de proteção radiológica adequado e eficaz.

2.2 Resumo das técnicas de ajuda para tomada de decisão utilizadas em proteção radiológica [23]

Em 1955, a CIPR recomendou que deveriam ser realizados todos os esforços para reduzir a irradiação causada por todos os tipos de radiação ionizante aos menores níveis possíveis. Ainda que os valores propostos para as doses máximas permissíveis sejam tais que envolvam um risco pequeno comparados com os outros perigos de vida, existem evidências incompletas

³ Muitas das Normas da CNEN se encontram sob revisão e/ou consulta pública, podendo em futuro próximo serem publicadas como resoluções.

sobre as quais estes valores foram baseados e ainda tem-se o conhecimento de que alguns efeitos da radiação são irreversíveis e cumulativos.

É importante que em um procedimento da otimização da proteção aplicado a um projeto, as opções de proteção possam ser identificadas a partir do momento que se tem as primeiras ideias acerca de uma nova tarefa. Desta maneira pode-se estudar a necessidade de se avaliar alternativas aos objetivos gerais e aos critérios.

A opção de proteção é determinada por meio de um projeto específico de proteção ou um conjunto de procedimentos operacionais específicos. A opção inicial para a avaliação das alterações propostas no processo de otimização é conhecida como caso básico. O caso básico pode ser, por exemplo, a opção de proteção mais barata em estudos de projetos ou pode ser o conjunto de procedimentos em uso em estudos operacionais.

Entende-se por custo da opção o custo financeiro direto e recursos da opção, juntamente com quaisquer outros custos, por exemplo, o treinamento. São conhecidos como desempenho da opção de proteção os resultados fornecidos por ela, tanto na aplicação de uma opção de projeto quanto na aplicação de um conjunto de procedimentos operacionais específicos.

Os fatores de proteção radiológica são aqueles relacionados ao grau de proteção a ser obtido. Um fator (ou atributo) a ser considerado no processo de otimização da proteção é necessariamente uma medida identificada do custo ou do desempenho, como o custo financeiro, dose coletiva, dose individual máxima, exigências de treinamento, desconforto causado pela roupa protetora, entre outros.

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

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

A técnica de ajuda para tomada de decisão mais simples é a análise custo-benefício. São dois os critérios que sempre devem ser utilizados na aplicação da técnica custo-benefício no processo de otimização da proteção: o valor alfa e os limites de dose anuais tanto para os trabalhadores como para o público, se estes últimos estiverem envolvidos.

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

$$X + \alpha S$$

onde:

X é o custo da radioproteção

S é o compromisso de Dose Efetiva Coletiva

α é o coeficiente monetário

Esta técnica nem sempre é aceita quando forem necessários outros fatores além da dose coletiva e do custo de proteção. Um problema de proteção radiológica mais complexo implica uma decisão também complexa.

O compromisso de dose coletiva como única medida do detrimento da radiação implica em igualdade precisa entre a dose coletiva no trabalhador e no público. Entre as doses coletivas resultantes de um grande número de doses pequenas e de um pequeno número de doses relativamente grandes; entre doses coletivas resultantes de doses individuais que são 10% ou 90% do limite apropriado. Quando estes dados forem igualmente aceitáveis o modelo mais simples custo-benefício é adequado, caso contrário são necessários fatores de ponderação.

A CIPR considera seis técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão para a otimização da proteção radiológica: análise custo-eficácia; análise custo-benefício diferencial; análise custo-benefício integral; análise custo-benefício expandido; análise de prioridades com atributos múltiplos e análise de critérios múltiplos excedentes. A solução analítica é apresentada pela opção de proteção considerada ótima em um processo de otimização de acordo com a técnica escolhida para a tomada de decisão. A CIPR deliberadamente absteve-se de recomendar uma técnica particular. Parte-se do pressuposto que a solução analítica depende dos fatores e critérios utilizados e independe da técnica de ajuda para a tomada de decisão escolhida. Foi dada ênfase no sentido de mostrar que os aspectos importantes da análise são: análise inicial do problema para gerar um conjunto de opções; identificar e quantificar os fatores pertinentes; adotar julgamentos explícitos em relação aos critérios para comparar o desempenho e o custo das opções, tornando o processo de análise mais transparente para inspeção.

A CIPR espera que a maior parte das situações não exija uma técnica mais complexa do que a análise de custo-benefício integral ou expandida. Contudo, recomenda a consideração das técnicas mais aceitáveis para cada caso, especialmente a análise de prioridades com atributos múltiplos, pelo discernimento no tratamento dos fatores difíceis de serem quantificados e pelo desenvolvimento da compreensão que ela pode estimular.

2.2.1. Análise custo-eficácia

Esta técnica de ajuda para a tomada de decisão utilizada em proteção radiológica é útil por permitir eliminar opções de proteção que não têm chance de se tornarem a solução analítica, por apresentarem custos e/ou doses maiores do que as outras próximas. Nesse processo são identificadas as opções de proteção custo-efetivas, isto é, aquelas que não foram eliminadas do processo de otimização pela técnica de análise custo-eficácia. A razão custo-eficácia é definida pelo aumento de custo ΔX e a correspondente variação na dose ΔS entre uma opção custo-efetiva e a opção subsequente. Portanto a razão custo-eficácia é representada pela equação:

$$\Delta X / \Delta S$$

2.2.2. Análise custo-benefício integral

A análise custo-benefício integral originou-se na teoria econômica do bem estar em 1977 e 1978 [23]. As equações que representam a solução analítica são:

$$(X+Y)_{\text{mínimo}} \text{ ou } (X+ \alpha S)_{\text{mínimo}}$$

Em que:

X representa o custo da opção de proteção que favorece a solução analítica

Y representa o custo do detrimento da opção de proteção de custo X

α representa o valor referência da dose coletiva unitária

S representa a dose coletiva da opção de custo X

Qualquer custo comum a todas as opções é sem importância para a escolha da opção ótima. Um fator pertinente poderia ser a fração que o custo de proteção representa no custo total da instalação.

2.2.3. Análise custo-benefício diferencial

Na técnica de tomada de decisão conhecida como análise custo-benefício diferencial apenas dois fatores podem ser computados, a saber: custo de proteção radiológica e dose coletiva anual. A equação matemática que representa a solução analítica é:

$$-\frac{X_i - X_{i-1}}{S_i - S_{i-1}} \leq \alpha$$

Em que:

X_i representa o custo de proteção da opção i

X_{i-1} representa o custo da opção de proteção anterior mais próxima da opção i

S_i representa a dose coletiva da opção de proteção i

S_{i-1} representa a dose coletiva da opção de proteção anterior mais próxima da opção i

α representa o valor referência da dose coletiva unitária

A solução analítica é a opção que fornece a relação mais próxima ao valor de α .

Em raras ocasiões esta análise pode apresentar mais de uma solução analítica quando a razão custo-eficácia não aumenta consistentemente, se as opções são ordenadas a partir dos maiores valores de S_i para os menores valores, isto é, quando podem existir vários mínimos. Quando o método diferencial não apresentar uma única solução, o método do custo-benefício integral deverá ser usado para se obter o verdadeiro mínimo.

2.2.4. Análise custo-benefício expandida

A análise custo-benefício expandida busca ampliar o número de variáveis que podem ser quantificadas. Esta técnica de ajuda para tomada de decisão introduz um ou dois fatores a mais, modificando o valor básico de α que passa a ser acrescido de outros termos β definidos em cada intervalo em que é dividido o fator extra. Neste caso a equação do custo do detrimento, Y , passa a ser descrito como:

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

Os termos β_j definem os valores monetários do fator extra em cada intervalo em que foi subdividido e S_j representa as doses coletivas em cada intervalo do novo fator.

Um fator pertinente em proteção radiológica é verificar se as doses são grandes ou pequenas em relação aos limites, isto é, para um mesmo valor de dose coletiva é preferível irradiar um grande número de pessoas com doses pequenas do que um pequeno número de pessoas com doses grandes, especialmente aquelas que se aproximam do limite.

2.2.5. Análise de prioridades com atributos múltiplos

A análise de prioridades com atributos múltiplos evoluiu a partir de várias disciplinas incluindo a psicologia, a engenharia e a ciência gerencial. Começou a desenvolver-se em 1961 e completou-se em 1968. A opção solução analítica pela análise de prioridades com atributos múltiplos é escolhida pelos pontos que ela conseguir angariar. A opção de proteção que tiver o maior número de pontos receberá a preferência ou a prioridade sobre os demais. Se duas opções forem equivalentes não haverá preferência de uma sobre a outra.

Além de especificar os fatores e quantificar as opções deve-se incluir critérios para classificar a importância de cada fator em relação aos demais. Como critério, introduz-se uma função de prioridade parcial u_j para cada fator j , a qual fornece a conveniência relativa do possível resultado para o fator j . A cada fator j é atribuída uma prioridade parcial $u_j=1$ ao melhor resultado ou consequência de menor adversidade, como por exemplo: custo menor ou dose coletiva mínima. É atribuída uma prioridade parcial $u_j=0$ para a pior consequência. Os demais valores serão intermediados entre zero e um.

Introduz-se também a função com atributos múltiplos U_i , que representa a figura de mérito ou “prioridade total” para cada opção i . Esta função pode ser expressa de uma forma aditiva, válida quando todos os fatores são independentes entre si:

$$U_i = \sum_{j=1}^N k_j u_{j,i}$$

Onde

N é o número de fatores

$u_{j,i}$ é a função de prioridade parcial que representa a figura de mérito da opção i para o fator j

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

Geralmente as constantes de crescimento são normalizadas de modo que $\sum k_j=1$. A solução analítica é dada pela opção de proteção que obtiver o maior U .

Considerando a técnica de ajuda para a tomada de decisão denominada de análise de prioridades com atributos múltiplos, ainda que existam várias técnicas para a geração das funções de prioridade parcial u_j , há uma técnica sugerida pela CIPR para a determinação de valores singulares $u_{j,i}$ válida quando o número de opções de proteção for maior do que dois. É a técnica desenvolvida por Keeney e Raffa entre 1976 e 1980, que consiste em atribuir uma prioridade parcial singular igual a zero para o pior valor X^0 (como, por exemplo, maior custo ou maior dose coletiva) e um valor singular de um para o melhor valor X^* (como por exemplo menor custo, menor dose coletiva). Os demais desempenhos terão valores entre zero e um.

Os valores entre zero e um não necessitam ser lineares, mas podem ser representados por qualquer curva que se queira como porções lineares em uma curva exponencial, curva logarítmica, curva potencial, entre outras. Dá-se preferência sempre à exponencial e para tanto, é necessário obter um terceiro ponto para individualizá-la.

Para determinar os valores singulares da função de prioridade parcial $u_{j,i}$ fazendo uso da curva exponencial podem ser usadas as expressões matemáticas:

$a - bc^{-cx}$ para a curva côncava crescente com $a>0$, $b>0$ e $c>0$ e para a curva côncava decrescente com $a>0$, $b>0$ e $c<0$;

$a + bc^x$, para a curva convexa crescente com $a>0$, $b>0$ e $c>0$ e para a curva convexa decrescente com $a>0$, $b>0$ e $c<0$.

Para caracterizá-la, é necessário o conhecimento de pelo menos um terceiro ponto. A posição relativa destes 3 pontos permite determinar a forma geral da função de prioridade com atributo singular como um aumento ou decréscimo da função côncava ou convexa. As constantes a , b e c são calculadas a partir das coordenadas dos 3 pontos. Estas coordenadas podem ser obtidas pelo tomador de decisão que tem a possibilidade de conhecer, por exemplo, o ponto x tal que $u(x) = 1/2$.

Para se determinar os valores singulares da função de prioridade parcial $u_{j,i}$, no caso da curva exponencial, pode ser determinado o terceiro ponto, além das extremidades cujos valores são conhecidos a partir de um ponto X para o qual $u(X)=1/2$ e pela resposta a várias questões. Pode-se, por exemplo, basear a escolha nas extremidades e no ponto médio $(X^0+X^*)/2$. Pode-se ainda responder qual seria a situação preferida entre as duas expostas a seguir:

- Existe uma consequência $(X^0+X^*)/2$
- Existe uma probabilidade de 0,5 para a consequência X^0 e também para a consequência X^* .

Para esta última hipótese há três respostas possíveis. Quando as duas situações são equivalentes, então, as prioridades associadas a elas também são equivalentes de modo que:

$$u[(X^0+X^*)/2]=[u(X^0)+u(X^*)]/2$$

pois $X^0=X^*$ e a função de prioridades com atributo parcial singular é linear.

$u(X)= A+B+CX$ com $A,B,C>0$ para as funções crescentes e $A,B>0$ e $C<0$ para as funções decrescentes.

Entretanto, se a primeira distribuição for preferida à segunda, teremos:

$$u[(X^0+X^*)/2]>[u(X^0)+u(X^*)]/2$$

Neste caso, a função de prioridade é côncava decrescente e corresponde à denominada “atitude de risco adverso”.

No caso da segunda distribuição ser preferida à primeira, teremos:

$$u[(X^0+X^*)/2]<[u(X^0)+u(X^*)]/2$$

A função de prioridade é convexa decrescente e corresponde à denominada “atitude de risco propenso”.

Há diferentes curvas escolhidas para a determinação dos valores singulares das funções de prioridade parciais dos diferentes fatores. Por exemplo: para o custo de proteção e para a dose coletiva, podem tomar a forma linear; para a dose individual máxima, a forma côncava decrescente.

Nesta técnica quantitativa de ajuda para tomada de decisão, as constantes de crescimento k_j podem ser determinadas pela avaliação direta ou pela avaliação por razões de substituição.

As constantes de crescimento k_j , na técnica de avaliação direta, constantes essas isoladas, podem ser determinadas impondo que a importância de cada fator é proporcional ao seu intervalo de variação, isto é, $X^* - X^0$, para em seguida serem normalizadas. A desvantagem desta técnica é ser muito parcial porque se um fator tiver um intervalo muito grande entre o seu melhor e o pior valor com relação aos demais fatores, ele predominará sobre os demais.

As constantes de crescimento, k_j , pela técnica de avaliação por razões de substituição podem ser determinadas dispondo a importância de cada fator em ordem decrescente, de acordo com a conveniência do tomador de decisão, e a seguir se estabelece a importância relativa de cada fator percentualmente com relação ao fator mais importante. Esses valores são por fim normalizados.

2.2.6. Análise de critérios múltiplos excedentes

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

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

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

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

- Indicador de vantagem – que expressa o quanto a opção i é preferível à opção m

- Critério de exclusão – que expressa em que grau as desvantagens da opção i, em relação à opção m, são significativas, para os fatores em relação aos quais i é preferível a m.

O indicador de vantagem $Ad_{i,m}$ usado na técnica de análise de critérios múltiplos excedentes é determinado fazendo:

$Ad_{i,m} = 1$ quando i for preferível ou equivalente a m para todos os fatores j

$Ad_{i,m} = 0$ quando i não for preferível a m para todos os fatores j

$0 < Ad_{i,m} < 1$ quando i for preferível ou equivalente a m para alguns dos fatores j

Neste último cálculo pode-se incorporar critérios de vantagem fazendo uso de constantes de crescimento k_j . Neste caso:

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

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

O critério de exclusão $Ec_{i,m}$, usado na técnica de análise de critérios múltiplos excedentes é determinado fazendo $Ec_{i,m} = 1$ quando os prejuízos associados à escolha da opção i, em vez de m, são muito grandes. Do outro modo $Ec_{i,m} = 0$.

Limiar de exclusão utilizado na técnica de análise de critérios múltiplos excedentes para a tomada de decisão representa o valor em que o prejuízo, isto é, a desvantagem de cada fator da opção i, é considerada muito grande com relação àquele da opção m.

2.3 Técnicas e ferramentas necessárias para a informatização dos programas de proteção radiológica

Buscando beneficiar o maior número possível de usuários, antes de dar início ao trabalho de informatização, foram realizadas várias pesquisas de investigação quanto às possibilidades de acesso à Tecnologia da Informação e da Comunicação pelas empresas em todo o Brasil. De acordo com publicações disponibilizadas pelo Comitê Gestor da Internet no Brasil [4 - 6] que realiza anualmente diversas pesquisas em todos os estados brasileiros, houve um avanço significativo no uso das tecnologias de informação em grande parte das empresas brasileiras. As pesquisas lideradas pelo Comitê Gestor da Internet no Brasil fazem uso dos padrões metodológicos propostos pela *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD), Conferência das Nações Unidas sobre o Comércio e o Desenvolvimento (CNUCED), descritos no *Manual for the Production of Statistics on the Information Economy*, Manual de Produção de Estatísticas Sobre a Economia da Informação, elaborados em parceria com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), pelo Instituto de Estatísticas da Comissão Europeia (EUROSTAT) e pelo *Partnership on Measuring ICT for Development*, Parceria para Mensuração de TIC para o Desenvolvimento, uma coalizão de

diversas organizações internacionais visando a harmonização de indicadores-chave em pesquisas TIC (Tecnologia da Informação e da Comunicação) [5].

Entre 2006 a 2008 houve um importante decréscimo na utilização da internet por acesso discado, passando de 14% a apenas 5% [4]. Ainda, houve avanço significativo quanto às redes corporativas internas sem fio que contemplava apenas 14% das empresas em 2005; já no ano de 2009, 41% das empresas brasileiras declararam possuir rede sem fio. Estes são apenas alguns dos exemplos que demonstram a rápida evolução dos acontecimentos e a tendência do mercado empresarial para acompanhar as mais novas tendências tecnológicas no intuito de se beneficiar o mais amplamente possível dos avanços das tecnologias de informação [5].

Até o início do trabalho de informatização, a publicação mais recente desta entidade [5] apontava que 97% das empresas brasileiras com mais de 10 funcionários já utilizavam computadores, e esse percentual aumentava para 100% em se tratando de empresas com número de funcionários igual ou superior a 50. O percentual médio de funcionários que faziam uso dos computadores em locais de trabalho equivalia a 45%. Dentre as empresas brasileiras que possuíam computador, 96% tinham acesso à internet, percentagem que atingia 99% se consideradas apenas empresas com 50 ou mais funcionários, e a proporção média de funcionários que faziam uso de computadores conectados à internet era de 38%. Quando estudadas separadamente cada região brasileira, os acessos à internet, na época, eram liderados pelas regiões sul e sudeste, com um percentual de 40%, e região centro-oeste, que apresentou as maiores proporções médias, com 43% dos funcionários que faziam uso da internet nos locais de trabalho [5].

Dentre as atividades predominantemente realizadas por funcionários nas empresas brasileiras, destacou-se em terceiro lugar, a busca de informações e atividades de pesquisa, atividades essas realizadas por 86% das empresas brasileiras. [6]

Acreditamos que os constantes avanços da tecnologia da informação podem trazer aportes significativos à indústria ou instalações que trabalham com material radiativo. Esse trabalho de pesquisa envolveu não apenas o estudo da evolução das novas tecnologias como meio de disseminação de informação, como também a pesquisa detalhada do conteúdo do programa de monitoramento, de forma a inter-relacionar informações hoje dispersas em várias publicações e documentos, de forma pertinente e consistente, utilizando o poder de processamento dos servidores aliado à tecnologia dos bancos de dados relacionais que permitirão realizar consultas complexas com tempo de resposta bastante reduzido.

Em posse desses dados, deu-se início à inteligência do sistema e à elaboração dos modelos de informatização da proteção radiológica. Foi implementado um projeto piloto em ambiente WEB, utilizando-se de ferramentas e recursos WEB 2.0 que permitem toda a estrutura organizacional que possibilitará os inter-relacionamentos e articulações necessários para a adequada informatização da proteção radiológica. Foi desenvolvida uma plataforma cuja gama de recursos e funcionalidades se adequem às necessidades do público corporativo. O desafio envolveu a capacidade de criar um sistema sólido e eficaz, mas ao mesmo tempo flexível, permitindo que se possa adaptá-lo futuramente às inovações tecnológicas.

A programação foi desenvolvida de maneira modular, permitindo a integração de todos os elementos – inter-relacionados e unificados – na base de busca e pesquisa. Entretanto cada módulo está sendo desenvolvido independentemente dos demais, podendo ser inserido, adaptado, atualizado ou suprimido separadamente sem prejuízo dos outros módulos constantes no sistema. Isso permitirá a adaptação do programa ao longo do tempo de acordo com as necessidades detectadas no decorrer do percurso. Estão sendo desenvolvidos motores de busca diferenciados para cada etapa do processo. A correta indexação dos conteúdos garante que serão promovidos pelos motores de busca permitindo encontrar as informações desejadas no menor tempo possível.

Para fins de atualização e alimentação do sistema, levando-se em consideração que a atualização de uma única norma pode incidir em dezenas de informações correlatas, foram criados modelos para que as informações sejam registradas sem redundância, ou seja, qualquer informação poderá ser registrada em sua forma mais atual a partir de um único registro, ainda que estejam inter-relacionadas com diferentes assuntos ou referenciadas em diferentes módulos.

Para a execução da informatização é necessária a utilização combinada de várias tecnologias, tanto para o desenvolvimento quanto para questões de infraestrutura, de forma a aproveitar e potencializar ao máximo os recursos disponíveis em cada uma delas e alcançar os objetivos propostos durante a fase de desenvolvimento. Em se tratando de um projeto original e com a perspectiva de longo prazo de utilização, considerou-se o padrão HTML (XHTML1 STRICT), de acordo com recomendação do W3C (World Wide Web Consortium) [26]. Inicialmente cogitou-se dimensionar uma infraestrutura que atenda um volume médio de acesso ao serviço, servidor WEB com sistema operacional Linux e servidor de banco de dados MySQL [27]. Caso durante a fase de implementação ou futuramente seja necessário escalar o servidor para uma demanda maior, poder-se-ia migrar a base de dados para um Servidor MS SQL Server [28].

O projeto segue os padrões de WEB 2,0 fazendo grande utilização de CSS, permitindo que o mesmo possa ser facilmente adaptado a novas possibilidades de meios de suporte, como acesso móvel, *feeds* de conteúdo e compartilhamento de informações. Há ainda uma grande preocupação com a SEO, para garantir que a informação seja indexada da melhor forma possível nos motores de busca da internet.

Quanto à linguagem de desenvolvimento do lado servidor, foi escolhido o PHP [29], por se tratar de uma tecnologia amplamente difundida, documentada, com uma comunidade extensa e atuante, e principalmente por ser uma linguagem dinâmica, flexível e de fácil manutenção. Outras tecnologias mais modernas, até a presente data, ainda apresentam diversos pontos de preocupação referentes à manutenção dos códigos fonte e a flexibilidade para evolução futura. O trabalho de informatização envolveu ainda o desenvolvimento gráfico do *site*, sua identidade visual e o layout de navegação (*wireframe*) adequado.

As tecnologias supramencionadas são programas atuais de utilização padrão para esse tipo de desenvolvimento de projeto mas serão constantemente revistas e são passíveis de alteração tendo em vista as constantes inovações no mercado da tecnologia da informação que certamente sofrerão alterações nos próximos anos.

3. METODOLOGIA UTILIZADA NO DESENVOLVIMENTO DO PRESENTE TRABALHO

3.1 Desenvolvimento do conteúdo

O desenvolvimento do conteúdo do presente trabalho envolveu identificar o real dimensionamento de cada programa e suas partes vitais, bem como seu detalhamento. Visando satisfazer as exigências, normas e diretrizes tanto nacionais quanto internacionais, o conteúdo trabalhado obedece às recomendações da CIPR e do OIEA e às normas da CNEN, contemplando:

- Conceitos e definições cuja terminologia foge do sentido dicionarizado [2; 3; 23; 30 – 32].
- Os princípios básicos da proteção radiológica: justificação, otimização e sistema de limitação de doses [2].
- Técnicas quantitativas para a tomada de decisão e simuladores construídos a partir da criação de componentes interativos virtuais [23].
- As estimativas do valor alfa [2; 22; 25; 30; 33 – 37].
- Os fatores a serem quantificados, contemplando a metodologia necessária para a aplicação do procedimento de otimização tanto para o projeto como para a operação da instalação radiativa [23 - 25].
- A construção do processo de otimização, considerando as suas características, o envolvimento dos interessados e a escolha da solução analítica; a distribuição das doses no tempo e no espaço e a matriz de dose coletiva para a tomada de decisão [24 - 25].
- Os procedimentos para avaliação das situações de exposição e o dimensionamento real de cada situação [24 - 25].
- Os princípios e meios de redução da exposição [24 - 25].
- Os componentes globais a serem considerados na definição e implementação de um programa ALARA [2; 23 - 25].

Considerando que estas informações encontram-se dispersas em diversos documentos publicados ao longo dos anos pelos organismos supramencionados, foi efetuado um trabalho de pesquisa de forma a identificar as informações passíveis de serem trabalhadas nas principais publicações que tratam da otimização da proteção radiológica, objeto de estudo deste trabalho. Foram utilizadas como referências básicas as publicações CIPR 22 [2], CIPR 55 [23], CIPR 101 – parte 2 [24], OIEA 21 [25] e CNEN NE 3.01 [3]. A partir desta pesquisa, foi possível o inter-relacionamento das informações e o desenvolvimento de motores de busca de acordo com as diferentes estruturas criadas e seus respectivos critérios de indexação.

3.1.1 Unificação, inter-relacionamento e informatização dos programas de otimização

As recomendações nacionais e internacionais para a elaboração de programas de otimização em proteção radiológica, de acordo com as publicações CIPR, OIEA e CNEN, foram informatizadas e dispostas da seguinte forma:

- Princípios de Radioproteção, que abrange: implicações das recomendações da CIPR 22, estimativas do valor alfa e novos estudos sobre o valor alfa.
- Otimização da Proteção Radiológica, contemplando: otimização e tomada de decisão em proteção radiológica, técnicas de ajuda para tomada de decisão, outras considerações sobre os esforços de proteção e ferramenta interativa – simuladores para as técnicas de ajuda para tomada de decisão.
- Características do processo, contendo: processo de otimização da proteção radiológica, características do processo e construção do projeto, envolvimento dos interessados, avaliação e análise das tarefas específicas, meios para reduzir a exposição à radiação ionizante e definição e implementação de um plano ALARA visando a proteção radiológica.

Cada um dos tópicos supramencionados trata de diversos itens correlacionados de acordo com as recomendações vigentes das publicações utilizadas. No item “Processo de otimização da proteção radiológica”, por exemplo, estão contidos os seguintes subtítulos: exigência básica do sistema de proteção radiológica, considerações sobre o processo de otimização, otimização da proteção radiológica, referências utilizadas no processo de otimização, passos a serem seguidos para um procedimento de otimização, revisões regulares da situação de exposição global, dose coletiva, decisões relacionadas à proteção, diferentes passos a serem executados em um estudo de otimização e avaliação da situação de exposição.⁴

O trabalho de pesquisa para a construção da informatização dos programas de proteção radiológica envolveu ainda a articulação das recomendações entre publicações. Tomemos como exemplo um dos subtítulos mencionados acima: “passos a serem seguidos para um procedimento de otimização”. O referido item foi trabalhado a partir de duas publicações: OIEA 21 e CIPR 101.

De acordo com as recomendações do OIEA [25], devem ser seguidos os seguintes passos para um procedimento de otimização:

1. Avaliação das situações de exposição para identificar a necessidade de um estudo de otimização.
2. Identificação e quantificação de fatores de redução de dose.
3. Análise do desempenho das opções com relação aos fatores de redução da dose e critérios de tomada de decisão.
4. Opções recomendadas para a proteção.

⁴ Todos os tópicos mencionados, bem como o conteúdo completo dos programas de proteção radiológica disponibilizados no *site* www.uniprorad.com.br encontram-se redigidos no ANEXO desta dissertação.

5. Decisão como base de um plano ALARA e sua implementação.
6. Avaliação e realimentação.

A CIPR [24], por sua vez, recomenda os seguintes passos a serem seguidos no desenvolvimento de um processo de otimização:

1. Avaliação da situação de exposição para identificar a necessidade da ação (construção do processo)
2. Identificação das possíveis ações de proteção para manter a exposição tão pequena quanto racionalmente exequível
3. Seleção da melhor opção nas circunstâncias prevalecedoras
4. Colocação em prática da opção selecionada por meio de um programa de otimização eficaz
5. Revisão regular da situação de exposição para avaliar se as circunstâncias prevalecedoras clamam para colocar em execução ações de proteção corretivas

Levando-se em consideração que neste caso essas publicações não são excludentes, porém complementares, articulamos as diretrizes constantes em ambas as publicações, de forma a se desenvolver um processo de otimização passo a passo, considerando as recomendações a serem seguidas de acordo com o OIEA, e ainda o que envolve o desenvolvimento de um processo de otimização sugerido pela CIPR, obtendo o seguinte resultado:

1. Avaliação das situações de exposição para identificar a necessidade de um estudo de otimização (construção do processo)
2. Identificação e quantificação dos fatores de redução das doses
3. Identificação das possíveis ações de proteção para manter a exposição tão pequena quanto racionalmente exequível
4. Análise do desempenho das opções com relação aos fatores de redução da dose e critérios de tomada de decisão
5. Opções recomendadas para a proteção
6. Determinação de solução analítica pelas técnicas de ajuda para a tomada de decisão
7. Decisão da melhor opção nas circunstâncias prevalecedoras
8. Implementação da opção selecionada por meio de um programa de otimização eficaz
9. Após a implementação da opção selecionada, avaliação dos resultados de proteção e realimentação
10. Revisão regular da situação de exposição para avaliar se as circunstâncias prevalecedoras clamam para colocar em execução ações de proteção corretivas.

Todas as informações disponibilizadas são referenciadas, de maneira que o usuário possa, a partir da bibliografia, aceder às informações da publicação em questão, sendo direcionado aos arquivos eletrônicos, quando disponibilizados pelos órgãos competentes (caso do OIEA, CNEN ou trabalhos científicos publicados) ou obtendo informações de como obter publicações originais não disponibilizadas via internet (caso das publicações da CIPR).

Além das referências, o programa oferece ao longo do texto um sistema de glossário destinado a termos utilizados no campo da proteção radiológica, mas que fogem ao sentido do dicionário. As definições também são referenciadas, de acordo com a publicação ou

publicações utilizadas. Podemos tomar como exemplo, a expressão “nível de investigação”, para a qual disponibilizamos duas definições:

- Valor de dose, ou grandeza a ela relacionada, obtido em um programa de monitoramento, cuja magnitude seja importante para justificar o seu registro. (CNEN - NN 3.01) [3]
- Um valor da dose efetiva ou da incorporação, geralmente, estabelecido tomando por base uma única medida, acima do qual, o resultado torna-se suficientemente importante para justificar uma investigação posterior. (Publicação 74 – CIPR) [30]

Apesar de o conteúdo ter sido desenvolvido de forma linear, nem sempre todas as informações aparecem em ordem lógica ao longo das publicações. O que agrega valor ao trabalho de informatização é a capacidade de oferecer ao usuário a possibilidade de articular cada um dos itens com um ou vários outros tópicos constantes nas diversas publicações. Voltando ao exemplo do tópico “passos a serem seguidos para um procedimento de otimização”, o leitor recebe uma pluralidade de sugestões de leitura de outros temas correlatos de diferentes publicações, como por exemplo: opção de proteção, revisões regulares da situação de exposição global, surgimento dos princípios básicos da radioproteção e técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão.

3.1.2 Simuladores com componentes interativos virtuais para as técnicas de ajuda para tomada de decisão

Foram desenvolvidos seis simuladores para auxílio no processo de tomada de decisão a partir da criação de componentes interativos virtuais. Cada simulador corresponde a uma técnica de ajuda para tomada de decisão, a saber:

- Análise custo-eficácia
- Análise custo-benefício diferencial
- Análise custo-benefício integral
- Análise custo-benefício expandida
- Análise de prioridades com atributos múltiplos
- Análise com critérios múltiplos excedentes

A programação dos simuladores foi desenvolvida em HTML e PHP [29] (linguagens computacionais) com auxílio do banco de dados relacional do MySQL e jQuery Library (javascript). Esse sistema é compatível com a maior parte dos navegadores e pode ser acessado por qualquer computador com uma conexão convencional de internet.

Em qualquer dos simuladores o usuário pode criar até dez opções a serem comparadas entre si. Os valores são preenchidos de acordo com as possibilidades oferecidas por cada uma das técnicas: valores monetários, valores de dose e, quando a técnica permite, outros critérios ou fatores, que podem ser qualitativos ou quantitativos, conforme descrito no item 2.2 da presente dissertação. Com base nas informações fornecidas pelo tomador de decisão, o

sistema propõe a solução analítica ótima e um memorial de cálculo que pode ser salvo ou impresso para ser entregue às autoridades competentes.

Todos os simuladores para as técnicas de ajuda para tomada de decisão foram desenvolvidos de acordo com as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica [23], salvo a técnica de análise de critérios múltiplos excedentes que sofreu uma inversão em uma das etapas, reduzindo consideravelmente os cálculos sem prejuízo do resultado final, conforme descrito a seguir.

A técnica de análise de critérios múltiplos excedentes é útil quando as opções não podem ser colocadas em ordem crescente ou decrescente quando comparados a cada fator. Na primeira etapa do sistema o tomador de decisão define fatores, critérios e opções de proteção radiológica a serem adotadas. Podem ser escolhidos até dez fatores qualitativos ou quantitativos. Nesta etapa, o usuário pode definir até dez opções a serem comparadas e preenche os campos com os respectivos valores. Caso algum fator expresse valores qualitativos, faz-se necessário estabelecer sua importância numérica. Nesta etapa ainda, são atribuídos o critério de exclusão e os indicadores de vantagem, além de outros critérios de eliminação caso as opções não se excedam entre si.

A segunda etapa compreende uma análise custo-benefício, considerando custos e doses de cada uma das opções e indicando as soluções custo-efetivas. O sistema sugere ainda soluções não custo-efetivas a serem eliminadas e apresenta um gráfico da análise custo-eficácia. A partir dessas informações, o usuário deve confirmar as opções a serem comparadas.

Na terceira etapa, diferentemente do método sugerido pela CIPR, o sistema calcula o critério de exclusão ($Ec_{i,m}$), deixando os indicadores de vantagem ($Ad_{i,m}$) para um próximo estágio. O programa calcula todos os índices de exclusão apresentando as tabelas de resultados. Essa inversão reduz consideravelmente os cálculos, limitando os indicadores de vantagem às opções que obtém valor zero. [38]

Na quarta etapa, os indicadores de vantagem são calculados de acordo com os resultados obtidos na tabela precedente. O sistema compara e avalia as opções excedentes. Essas opções são comparadas e, quando necessário, são aplicados outros critérios de eliminação.

Uma vez alimentados com os dados apropriados, todos os simuladores demonstraram grande desempenho, calculando as melhores opções em apenas alguns segundos. O sistema permite ainda que os usuários retrocedam, a qualquer tempo, a qualquer das etapas precedentes de maneira a rever os dados preenchidos e alterar valores, calculando e recalculando resultados quantas vezes se fizerem necessárias.

3.2 Monitoramento do perfil de utilização do sistema: análise dos dados de acesso

Os relatórios de perfis de análise do sistema fornecem informações de acesso a respeito de sua utilização por universidades, indústrias e outras instalações. A análise dos relatórios determinará a evolução futura do projeto, apontando atalhos que poderão ser criados para buscas frequentes ao *site* e proporcionará uma maior agilidade no processo de pesquisa do

usuário, e na inteligência de indexação das informações dispostas. Por se tratar de um projeto inédito, essas informações são importantes para o aprimoramento e direcionamento do presente trabalho, de forma a trazer aportes significativos no campo da proteção radiológica e avaliar seu potencial enquanto ferramenta de disseminação de informação nos ambientes corporativo e acadêmico.

Uma vez publicado em ambiente de produção, foram criados relatórios de perfis de análise, para investigação do perfil do público usuário: quem são os profissionais, que informações buscam, quais as informações mais acessadas. Foi considerada a utilização de relatórios dinâmicos que poderiam apontar dados qualitativos e quantitativos, por meio de ferramentas combinadas que possam prover informações importantes ao presente trabalho.

3.2.1 Integração com *Google Analytics* e relatórios internos

O *Google Analytics* fornece relatórios estatísticos de acesso ao *site*, permitindo diversas comparações meio de gráficos ou tabelas. Dentre as informações fornecidas, pode-se destacar a quantidade de visitantes únicos, número de acessos, porcentagem de novos visitantes, usuários que retornam ao *site*, número de visualização de páginas, tecnologias utilizadas e localização geográfica dos usuários. O relatório geral aponta ainda a duração média das visitas, sistemas operacionais utilizados, idioma de visualização e índice de rejeição do *site*.

O relatório intitulado Tempo Real – Beta, fornece, em tempo real, informações sobre a utilização do sistema, tais como número de visitantes conectados, localização geográfica e páginas ativas.

Diferentemente do *Google Analytics* que provê informações de acesso ao sistema, os relatórios internos fornecem informações sobre os perfis de acesso dos usuários: idade, escolaridade, segmento de trabalho, área de atuação profissional e finalidade do acesso ao *site*.

3.2.2 Inteligência do sistema de atualização

As informações obtidas por meio dos relatórios fornecem dados para a evolução do sistema e atualização, de acordo com o perfil dos usuários e o perfil de utilização do sistema.

Para a implantação do projeto piloto em ambiente WEB, foi prevista uma estrutura organizacional que possibilitou os inter-relacionamentos e articulações necessários para a adequada informatização da proteção radiológica. Além do desenvolvimento de uma com diversos recursos e funcionalidades condizentes com as necessidades do público corporativo, com flexibilidade suficiente para permitir futuras adaptações às inovações tecnológicas, os pesquisadores levantaram a necessidade do desenvolvimento de um sistema dinâmico de atualizações que garantirá a continuidade do projeto no longo prazo.

Levando-se em consideração que as normas e recomendações sofrem constantes modificações com o passar do tempo, o *software* foi desenvolvido de maneira modular. Desta

maneira, pode-se trabalhar a integração de todos os elementos – inter-relacionados e unificados – na base de busca e pesquisa, ainda que cada módulo tenha sido desenvolvido independentemente dos demais.

Para fins de atualização e alimentação do sistema, considerando que a atualização de uma única informação pode impactar em diferentes áreas do sistema contendo informações correlatas, o sistema prevê o registro e a modificação das informações sem redundância. Qualquer informação pode ser alterada, a qualquer tempo, a partir de um único registro, resultando na atualização imediata em todos os diferentes módulos que contém a informação ou referência à modificação realizada.

A inteligência do sistema de atualização prevê flexibilidade de evolução conforme as informações obtidas por meio dos relatórios do perfil de acesso e do perfil de usuário. Toma-se como exemplo as informações fornecidas quanto aos navegadores utilizados pelo público usuário. Foi detectado no relatório do *Google Analytics* uma porcentagem significativa de acessos por tecnologias móveis, ou seja, indivíduos que buscam informações no *site* com auxílio de *tablets* ou celulares. Esta informação tem forte impacto no desenvolvimento do projeto, pois aponta a necessidade do desenvolvimento de novas ferramentas integradas ao sistema de atualização, como sistemas de alerta ao usuário a cada vez que o sistema é atualizado.

4. RESULTADOS, DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

4.1 Dos programas de otimização da proteção radiológica

A partir do discernimento e dimensionamento dos programas de otimização, as informações foram disponibilizadas de forma a satisfazer todos os passos a serem seguidos para a elaboração de um programa de otimização.

O conteúdo foi trabalhado em forma de tópicos detalhados que respondem a todas as questões que devem ser colocadas quando da elaboração de um programa de otimização. Desta maneira, o indivíduo que se propõe a montar seu plano de otimização tem à sua disposição todas as questões às quais deve responder, podendo adaptá-las à sua situação ou eliminá-las quando não forem pertinentes. Seguindo os tópicos disponibilizados no *site* <http://www.uniprorad.com.br> o indivíduo poderá responder a todas as questões cabíveis aplicadas à sua situação. Todo o conteúdo do *site* está detalhado e disponível no ANEXO da presente dissertação.

De forma a atender às recomendações internacionais, o conteúdo foi disponibilizado conforme descrito a seguir.

4.1.1. Princípios de Radioproteção

a. Implicações das recomendações da CIPR 22 [2; 22]

Esta publicação embasa a prática da otimização da proteção radiológica e introduz o Princípio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), fundamentando a ideia de que as doses de radiação devem ser tão pequenas quanto racionalmente exequíveis. Fazem parte deste item os seguintes tópicos:

- Efeitos biológicos da radiação
- Surgimento dos princípios básicos da radioproteção
- Introdução às grandezas Detrimento e Dose Coletiva
- Discussão do parágrafo 47 da publicação da CIPR nº 9 de 1966, itens a e b
- Estimativa do custo do detrimento
- Cálculo simplificado do Valor Alfa pela CIPR
- Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA

b. Estimativas do valor alfa [2; 25; 30; 33]

Além da publicação da CIPR 22, de forma a oferecer informações completas que auxiliem a responder às questões para o desenvolvimento de um programa de otimização, foram utilizadas as publicações da CIPR nº 37 e 74, bem como a Série de Relatórios de Segurança 21 do Organismo Internacional de Energia Atômica e o livro intitulado ALARA: From Theory Towards Practice [33]. Para compor este item, foram desenvolvidos os seguintes tópicos:

- Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR
- Probabilidade do efeito: principais propósitos para definir o detrimento e recomendações da CIPR
- Principais métodos para o cálculo do custo atribuído ao detrimento da saúde
- Abordagem do Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA
- Abordagem da Junta Nacional de Radioproteção (National Radiation Protection Board) da Inglaterra
- Abordagem do Centro de Estudos sobre a Avaliação da Proteção no Domínio Nuclear (Centre d'Études sur L'Évaluation de La Protection dans le Domain Nucléaire) da França
- Exemplos de Valores monetários usados para a dose coletiva unitária

c. Novos estudos sobre o valor alfa

Baseados no item anterior, os novos estudos sobre o valor alfa não constam nas publicações internacionais do CIPR ou OIEA, mas foram desenvolvidos a partir de trabalhos científicos apresentados em congressos internacionais [34 - 37]. O intuito deste item é proporcionar reflexões e fornecer subsídios para que o responsável pela elaboração dos programas de otimização leve em consideração diversos fatores que podem ser considerados quando do processo de tomada de decisão. Os tópicos abordados neste item são:

- O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica
- O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Exemplo da pequena mina utilizada na publicação 55 da CIPR
- O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Aumento do valor alfa em função da geometria da blindagem
- Análise de sensibilidade: Argumento da linearidade entre as diferentes opções de proteção radiológica
- Otimização da proteção radiológica usando derivadas
- Mudança de filosofia para o critério alfa: função variável baseada na dose individual máxima

4.1.2. Otimização da Proteção Radiológica [23]

a. Otimização e tomada de decisão em proteção radiológica

Baseado na publicação da CIPR 55, esse item contempla a introdução às técnicas de ajuda para a tomada de decisão, que inclui os seguintes tópicos:

- Introdução
- Opção de proteção
- Técnica de ajuda para tomada de decisão: custo-benefício
- Procedimento de otimização de Proteção Radiológica aplicado ao projeto e à operação
- Técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão

b. Técnicas de ajuda para tomada de decisão

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR) considera seis técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão para a otimização da proteção radiológica. Entretanto, a CIPR deliberadamente absteve-se de recomendar uma técnica em particular. Foi dada ênfase no sentido de mostrar que os aspectos importantes da análise são: análise inicial do problema para gerar um conjunto de opções; identificar e quantificar os fatores pertinentes; adotar julgamentos explícitos com relação aos critérios para comparar o desempenho e o custo das opções, tornando o processo de análise mais transparente para inspeção. Os tópicos a seguir foram desenvolvidos conforme recomendações da publicação da CIPR 55.

- Exemplo da pequena mina de urânio
- Análise custo-eficácia
- Análise custo-benefício integral
- Análise custo-benefício diferencial
- Análise custo-benefício expandida
- Análise de prioridades com atributos múltiplos
- Análise de critérios múltiplos excedentes
- Escolha da técnica de ajuda para tomada de decisão

c. Outras considerações sobre os esforços de proteção

- Custos dos esforços de proteção
- Distribuição da dose no tempo
- Outros fatores de proteção radiológica pertinentes para o processo de otimização
- Aplicação do procedimento de otimização da proteção radiológica
- Responsabilidades gerais das autoridades competentes

d. Ferramenta interativa – SIMULADORES

Foram desenvolvidos seis simuladores aqui disponibilizados de acordo com os critérios e metodologia estabelecidos na Publicação CIPR 55. No intuito de auxiliar o tomador de decisão a identificar a solução analítica ótima, os simuladores oferecem a oportunidade de múltiplas análises nas diferentes técnicas, possibilitando trabalhar uma grande quantidade de dados com um tempo de resposta bastante reduzido. São eles:

- Análise custo-eficácia
- Análise custo-benefício diferencial
- Análise custo-benefício integral
- Análise custo-benefício expandido
- Análise de prioridades com atributos múltiplos
- Análise de critérios múltiplos excedentes

4.1.3. Características do processo [24 – 25]

Para a elaboração do conteúdo de otimização no que concerne às características do processo, foram trabalhadas conjuntamente duas publicações, a saber: Publicação CIPR 101 – parte 2 [24] e Série de Relatórios 21 do OIEA [25]. Ambas as publicações fornecem recomendações quanto às características do processo, porém a ênfase atribuída às etapas do processo, bem como as especificidades do passo a passo não são as mesmas. As informações constantes nas referidas publicações foram inter-relacionadas e disponibilizadas em uma ordem lógica de forma a satisfazer a todas as questões a serem consideradas no processo de otimização da proteção radiológica.

a. Processo de otimização da proteção radiológica

- Exigência básica do sistema de proteção radiológica
- Considerações sobre o processo de otimização
- Otimização da proteção radiológica
- Referências utilizadas no processo de otimização
- Passos a serem seguidos para um procedimento de otimização
- Revisões regulares da situação de exposição global
- Dose coletiva
- Decisões relacionadas à proteção
- Diferentes passos a serem executados em um estudo de otimização
- Avaliação da situação de exposição

b. Características do processo e construção do projeto

- Principais características de um processo de otimização de proteção radiológica
- Principais indicadores
- Otimização para situações normais, existentes e de emergência
- Revisões planejadas e alimentação do processo
- Implantação eficaz da otimização
- Estádios do projeto
- Participação dos interessados e principais atributos

c. Envolvimento dos interessados

- Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR
- A consciência por parte dos trabalhadores
- Dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização
- Responsabilidade da decisão final

d. Avaliação e análise das tarefas específicas

- Avaliação prévia das tarefas a serem realizadas
- Ordem detalhada dos passos de uma tarefa de otimização
- Como obter os dados necessários ao processo de otimização da proteção radiológica
- Distribuição da exposição à radiação ionizante nas atividades humanas

- Distribuições da exposição à radiação ionizante no tempo e no espaço
- Matriz de dose coletiva e o processo de tomada de decisão na otimização

e. Meios para reduzir a exposição à radiação ionizante

- Meios gerais para reduzir a exposição à radiação ionizante
- Educação geral do trabalhador
- Consciência e envolvimento dos trabalhadores
- Melhoria na comunicação
- Meios específicos à tarefa para reduzir a exposição à radiação ionizante
- Redução do tempo de exposição, número de trabalhadores e taxas de dose
- Treinamento especializado

f. Definição e implementação de um plano ALARA visando a proteção radiológica

- Estrutura para um plano ALARA
- Análise e seleção de opções de trabalho específicas para a redução das doses à radiação ionizante.
- Principais indicadores da eficácia do monitoramento de um plano ALARA
- Aplicação da otimização em operações envolvendo radiações ionizantes e em regulamentos
- Valor monetário da dose coletiva unitária: valor alfa

4.2. Do programa de informatização

O programa de informatização, intitulado UNIPRORAD (Unificação dos Programas de Proteção Radiológica), foi desenvolvido em linguagem HTML e PHP (linguagens computacionais) com auxílio do banco de dados relacional do MySQL e jQuery Library (javascript) [28 – 29]. Esse sistema é compatível com a maior parte dos navegadores de internet e pode ser acessado a partir de qualquer computador com uma conexão convencional de internet. Em virtude das constantes inovações tecnológicas [26], durante todo o tempo de planejamento e execução do sistema de informatização, foi realizado um trabalho de pesquisa e acompanhamento de novas tecnologias relacionadas que ofereciam novas possibilidades ou limitações para o desenvolvimento do presente projeto. Essas informações permitiram a adequação do projeto inicial de acordo com a evolução da tecnologia da informática, suas novas tendências e diretrizes, para que se cumprissem com qualidade e completude os objetivos propostos.

Além do trabalho de pesquisa para adequação do conteúdo dos programas de otimização e da constante pesquisa relacionada à inovação tecnológica, foi realizado o monitoramento do perfil de utilização do programa de informatização. Uma vez publicado em ambiente de produção, foram criados relatórios de perfis de análise, para analisar o perfil do público usuário: quem são os profissionais, que informações buscam, quais as informações mais acessadas. Foi considerada a montagem de relatórios dinâmicos com dados qualitativos e quantitativos, fazendo uso de diversas ferramentas que, utilizadas separadamente ou combinadas entre si poderiam prover informações importantes ao presente trabalho. Os

relatórios de perfis de análise do sistema fornecem informações de acesso a respeito de sua utilização por universidades, indústrias e outras instalações.

A análise dos relatórios determinará a evolução futura do projeto, apontando atalhos que poderão ser criados para buscas frequentes ao *site* e proporcionará uma maior agilidade no processo de pesquisa do usuário, bem como na inteligência de indexação das informações dispostas. Por se tratar de um projeto inédito, essas informações são importantes para o aprimoramento e direcionamento do presente trabalho, de forma a trazer aportes significativos no campo da proteção radiológica e avaliar seu potencial enquanto ferramenta de disseminação de informação nos ambientes corporativo e acadêmico.

4.2.1 Integração com *Google Analytics*

O *Google Analytics* não fornece informações diretamente relacionadas com os usuários conectados do sistema, porém traz um número elevado de relatórios estatísticos do *site*. O relatório geral do *Analytics* [figura 1 e figura 2] traz informações sobre as principais métricas das visitas ao *site*, permitindo compará-las por meio de gráficos ou tabelas interativas, a respeito do número de visitantes, comportamentos frequentes, tecnologias utilizadas e uso de tecnologias móveis. A ferramenta permite a criação de relatórios personalizados de acordo com os interesses do administrador do sistema. Desta maneira, é possível identificar o número de acessos a áreas específicas do *site* e monitorar rotas de percurso dos usuários. Pode-se, por exemplo, monitorar o acesso a determinado simulador de técnica de ajuda para tomada de decisão, identificando o número de acessos diários, número de páginas acessadas do simulador e a porcentagem de usuários que concluíram a simulação.

O relatório geral aponta o número de visitas ao *site*, número de usuários cadastrados, número de visualizações de páginas, duração média das visitas ao *site*, taxa de rejeição, porcentagem de novas visitas, entre outras informações. O relatório padrão do *Analytics* provê ainda informações demográficas detalhadas a respeito da origem de tráfego: país ou território de origem [figura 3], cidade e idioma do navegador utilizado. O relatório traz informações específicas quanto ao meio de acesso ao sistema, seja ele por meio de computadores ou tecnologias móveis, tais como celulares. Ainda, o relatório aponta informações a respeito dos sistemas operacionais utilizados pelos usuários [figura 4], bem como provedores de serviços, sistemas operacionais e resoluções de telas. Por meio desta ferramenta o pesquisador tem acesso a importantes informações para identificação do perfil do público usuário, como os principais browsers utilizados e a porcentagem de acessos por tecnologias móveis, informações fundamentais para o planejamento estratégico da evolução do sistema.

Figura 1: UNIPRORAD - Relatório geral de acesso (26/06/2012). Onde está escrito “returning visitor”, leia-se “retorno de visitantes”. Onde está escrito “new visitor”, leia-se “novos visitantes”.

Figura 2: UNIPRORAD - Relatório geral de acesso (27/07/2012). Onde está escrito “returning visitor”, leia-se “retorno de visitantes”. Onde está escrito “new visitor”, leia-se “novos visitantes”.

Figura 3: UNIPRORAD - Relatório de informações demográficas (27/07/2012). Onde está escrito “returning visitor”, leia-se “retorno de visitantes”. Onde está escrito “new visitor”, leia-se “novos visitantes”.

Figura 4: UNIPRORAD - Relatório sobre navegador e sistema operacional (27/07/2012)

O *site* foi disponibilizado em ambiente de produção no mês de março e o fluxo de visitas tem sido monitorado desde então, uma vez que a informatização tem por objetivo a disseminação do conhecimento no campo da otimização da proteção radiológica. A preocupação inicial com as recomendações internacionais do W3C (World Wide Web Consortium) [26] quanto à programação e critérios de indexação mostrou bons resultados. Em apenas dois meses os principais motores de pesquisa (Google, Bing, Altavista e Yahoo) trazem o *site* UNIPRORAD dentre as suas cinco primeiras indicações.

Comparando as figuras 1 e 2, pode-se analisar alguns dados da evolução do fluxo de visitas ao *site*. O número de visitantes únicos indica o número de usuários que acessaram o sistema durante os 30 dias anteriores à data do relatório. O número de visitantes indica quantas vezes o *site* foi acessado durante o mesmo período. O relatório fornecido pela figura 1 mostra que entre 26/05/2012 e 26/06/2012 o *site* UNIPRORAD teve 79 visitas de 43 usuários, dentre os quais 49,37% acessaram o *site* pela primeira vez enquanto 50,63% configura retorno de usuários. Pode-se observar na figura 2 que no período entre 27/06/2012 e 27/07/2012, o relatório fornecido pelo *Google Analytics* registra um aumento de 84% nos acessos ao *site* (146 visitas de 50 visitantes únicos), dos quais 70,55% de usuários que retornaram ao *site*; 29,45% de novos visitantes. Verifica-se ainda um total de 3.063 páginas visualizadas no período, o que representa um aumento de 126% quando comparado com o período anterior, que registra um total de 1.353 visualizações.

4.2.2 Relatórios internos

Para acessar o conteúdo específico de otimização e simuladores das técnicas de ajuda para tomada de decisão, o usuário deve preencher um cadastro com as seguintes informações: nome, idade, localização geográfica, escolaridade, empresa, área de atuação e finalidade de uso do *site*. A partir dos dados obtidos por meio deste cadastro foram criadas ferramentas internas para monitorar os acessos do público usuário.

Enquanto o *Google Analytics* provê informações de acesso ao sistema, os relatórios internos possibilitam obter informações sobre os perfis de acesso dos usuários: por segmento de trabalho, área de atuação profissional e atividade buscada (coleta de dados, planejamento estratégico, pesquisa acadêmica), entre outras. As informações são armazenadas em um banco de dados e geram automaticamente alertas quando determinados assuntos possuem um elevado volume de busca.

Até a data mais recente da emissão de relatórios internos (17/07/12), as seguintes informações foram coletadas:

- **Dados por região:** 2,9% dos usuários encontram-se no nordeste, 2,9% no sul do país e 94% na região sudeste.
- **Finalidade de uso:** 67,6% das pessoas acessaram o *site* para pesquisas acadêmicas; 5,9% para planejamento; 2,9% coleta de dados para fins profissionais. 23% declararam outras finalidades.
- **Faixa etária:** 17,6% declararam ter idades entre 16 e 24 anos; 20,6% entre 25 e 34 anos; 23,5% de 45 a 59 anos e 8,8% acima de 60 anos de idade.

- **Área de atuação:** 38,2% do público cadastrado declarou atuar no setor privado (serviços); 29,4% dos indivíduos cadastrados provém de universidades e institutos de pesquisa; 20,6% do setor público; 5,9% provenientes do setor privado (comércio); 2,9% profissionais do setor privado (indústria) e 2,9% dos cadastrados são estudantes (do ensino médio).

4.3. Aportes deste trabalho frente ao cenário mundial

Organizações de diversos países investem na informatização como ferramenta para disseminação do conhecimento. O presente projeto de pesquisa foi apresentado com diferentes enfoques [38-40] em importantes congressos internacionais ao lado de projetos de grande expressividade realizados por pesquisadores de diversas nações, conforme referências a seguir.

No Simposio Internacional sobre Protección Radiológica, realizado no Peru, foram apresentados no dia 4 de abril de 2012, na Sessão de Capacitação e Difusão da Proteção Radiológica, importantes projetos que articulam a proteção radiológica e a tecnologia da comunicação [40-42]. No informe final sobre o Simpósio Internacional sobre Protección Radiológica, disponibilizado na internet no endereço <http://www.proteccion-radiologica.blogspot.com> o Engenheiro Eduardo Medina Gironzini, presidente do evento, escreveu para a comunidade da América Latina:

“Na Sessão 9, sobre capacitação e difusão da proteção radiológica, se destacou o uso das tecnologias da informação e comunicação. Foi mostrada a experiência espanhola na formação em temas nucleares e radioproteção para alunos de escolas por meio da Internet. Observou-se que é viável contar com uma ferramenta de pesquisa e fornecer dados relevantes para trabalhar com a proteção radiológica, conforme se pode observar no projeto brasileiro. Destacou-se o uso de correio eletrônico e listas de discussão para manter-se atualizado em questões de proteção radiológica, especialmente em países de língua espanhola, mas também se ressaltou a importância do uso de redes sociais para discutir questões técnicas que contribuem para melhoria da proteção às radiações na região.”⁵

No IRPA 13, 13º Congresso Internacional da Associação Internacional de Proteção Radiológica, realizado em Glasgow, Escócia, em maio de 2012, foram apresentados importantes projetos,

⁵ Texto original: “En la sesión 9, sobre capacitación y difusión en protección radiológica, se resaltó el uso de las tecnologías de información y comunicación. Se mostró la experiencia española en la capacitación en temas nucleares y de protección radiológica para alumnos de los colegios haciendo uso de Internet. Se apreció que es factible contar con una herramienta de búsqueda y suministro de datos relevantes para trabajar en protección radiológica según se pudo ver en el proyecto brasileiro. Se resaltó el uso del correo electrónico y las listas de interés para mantenerse al día en los temas de protección radiológica especialmente en los países hispanoparlantes, pero también se señaló que es muy importante hacer uso de las redes sociales para tratar temas técnicos ya que contribuyen al mejoramiento de la protección radiológica en la región.”

desenvolvidos por pesquisadores de diferentes nações, como França [43] e Peru [44], além do Reino Unido [45-46] e Brasil [38-39], confirmando os esforços da comunidade internacional em articular as novas possibilidades da tecnologia da informação à radioproteção. Há ainda um projeto de pesquisa intitulado REPROLAM, *Red de Optimización de Protección Radiológica Ocupacional en Latino América* [47], esforço coletivo para benefício dos países da América Latina, com apoio do Organismo Internacional de Energia Atômica, que trata da divulgação de informações sobre a otimização e disponibilização de documentos concernentes. Todas as informações deste *site* são disponibilizadas unicamente no idioma espanhol.

O investimento na informatização da proteção radiológica cresceu significativamente nos últimos dois anos e o presente trabalho vai ao encontro dos esforços mundiais de aproveitar ao máximo os benefícios das tecnologias da informação e comunicação para a disseminação da informação. As inovações tecnológicas e os dados obtidos neste projeto de pesquisa nos apontam novas possibilidades para a continuidade da informatização dos programas de proteção radiológica para países de língua portuguesa.

5. TRABALHOS FUTUROS

Após dimensionamento, execução e avaliação de resultados do sistema operacional e trabalho de pesquisa dos programas de otimização de proteção radiológica, propomos como possibilidades de trabalhos futuros o que segue:

- Desenvolver um sistema operacional integrado, com área de acesso restrita, que possa ser estendido e utilizado posteriormente por múltiplas equipes pertencentes a diferentes segmentos da proteção radiológica.
- Criar soluções integradas do sistema às novas possibilidades da tecnologia móvel de forma que tragam aportes ao sistema já disponibilizado na internet.
- Inter-relacionar os programas de otimização já informatizados à filosofia e técnica do monitoramento da radiação ionizante.
- Informatizar as filosofias e procedimentos de monitoramento da radiação ionizante, tanto no local de trabalho quanto individual, indicando como escolher os pontos de monitoramento nos locais de trabalho e sua frequência e indicando como escolher os trabalhadores a serem monitorados.
- Fornecer subsídios instrucionais sobre a escolha dos equipamentos de proteção radiológica para uso em locais de trabalho como pessoais, incluindo o monitoramento individual interno. Devem ser contemplados os equipamentos dedicados a situações normais e potenciais de trabalho, bem como cuidados e controles internos com esses equipamentos.
- Informatizar o capítulo de descontaminações de materiais radioativos, incluindo os procedimentos de descontaminação e determinando os seus fatores.
- Informatizar o gerenciamento de rejeitos radioativos, desde a sua produção, coleta etc até a sua deposição.
- Informatizar os tipos de treinamento que devem ser fornecidos aos trabalhadores e como viabilizar a implementação do aprimoramento da equipe de proteção radiológica.
- Informatizar como pode ser realizada a seguridade, ou seja, a proteção física das fontes de radiação ionizante e do equipamento de proteção e segurança.
- Informatizar os procedimentos de garantia da qualidade do plano de proteção radiológica, isto é, do assunto tratado no presente trabalho, bem como todos os outros assuntos referenciados neste capítulo.

ANEXO

CONTEÚDO DETALHADO DOS PROGRAMAS DE OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Conforme descrito no capítulo 4 da presente dissertação, a partir do discernimento e dimensionamento dos programas de otimização, as informações foram disponibilizadas de forma a satisfazer todos os passos a serem seguidos para a elaboração de um programa de otimização.

O conteúdo foi trabalhado em forma de tópicos detalhados que respondem a todas as questões que devem ser colocadas quando da elaboração de um programa de otimização. Desta maneira, o indivíduo que se propõe a montar seu plano de otimização tem à sua disposição todas as questões às quais deve responder, podendo adaptá-las à sua situação ou eliminá-las quando não forem pertinentes. Seguindo os tópicos disponibilizados no *site* <http://www.uniprorad.com.br> o indivíduo poderá responder a todas as questões cabíveis aplicadas à sua situação. Todo o conteúdo do *site* está detalhado e disponível neste ANEXO.

O referido *site* contém as informações detalhadas dos programas de otimização de proteção radiológica disponibilizados com indicações das publicações utilizadas no desenvolvimento de cada tópico, bem como indicações dos inter-relacionamentos entre os diversos assuntos e publicações.

1. PRINCÍPIOS DA RADIOPROTEÇÃO

1.1. Implicações das recomendações da CIPR 22

1.1.1. Efeitos biológicos da radiação (Publicação 22 - CIPR)

Os tipos de efeitos biológicos que aparecem no ser humano irradiado por radiação ionizante podem ser efeitos agudos ou tardios graves. São diferenciados pelo fato que os efeitos agudos apresentam uma dose limiar, abaixo da qual o efeito não é clinicamente detectado e nos efeitos tardios graves unicamente alguns indivíduos do grupo irradiado apresentarão estes efeitos, portanto tudo leva a crer que o aumento da dose faz com que aumente a probabilidade de aparecimento do efeito. O problema que a CIPR anteviu é que a extrapolação de uma curva de incidência de efeitos tardios graves em função da dose individual para pequenos valores dela, geralmente torna-se difícil e imprecisa e em virtude disso, houve por bem se basear em duas hipóteses:

1. Os efeitos tardios não têm dose de radiação limiar, isto é, a qualquer dose, por menor que seja, está associado um risco como no caso dos efeitos hereditários
2. A relação dose-efeito é linear em doses pequenas

A CIPR definiu o risco, R , como a probabilidade de sofrer um efeito deletério como resultado de uma dose de radiação para um dado indivíduo. Se r_i é o coeficiente de probabilidade de sofrer o i -ésimo efeito, então:

$$R = 1 - \prod_i (1 - r_i)$$

As aproximações admitidas são:

1. Quando os diferentes efeitos são mutuamente exclusivos, a expressão da definição torna-se: $R = \sum_i r_i$
2. Quando os valores do r_i forem muito menores do que 1, isto é, $r_i \rightarrow 0$, ainda que não sejam mutuamente exclusivos, pode-se usar a somatória.

A melhor expressão matemática que descreve a incidência dos efeitos tardios graves com relação à dose até o valor de alguns grays é a quadrática, isto é:

$$E = aD + bD^2$$

Em que

E representa o efeito biológico
 D representa a dose absorvida
 a e b são constantes

O termo quadrático bD^2 predomina em doses absorvidas elevadas, geralmente acima de 1 gray e em taxas de dose absorvidas também elevadas, acima de 1 Gy/min, enquanto que em taxas de dose pequenas menores ou iguais a 1 Gy, o termo linear aD e a inclinação que ele representa torna-se predominante. Considerar a relação efeito-dose linear para doses

individuais inferiores a 1Gy é muito restritiva com relação a se fosse uma relação quadrática ou se fosse comprovada a hormesis, ou ainda se fosse admitida uma dose limiar. Isso porque implica que o ganho, pela população, na redução de uma dose unitária é o mesmo, independentemente do valor da dose e taxa de dose administrada. Isto muitas vezes leva a uma superestimativa do ganho social pela população na redução da dose, realmente não compensado pela diminuição do efeito nestes valores de dose e taxa de dose pequena e isso pode levar a um gasto de esforços que não são compensados pelos correspondentes ganhos sociais. No gráfico [figura 5] mostra-se as três diferentes possibilidades dos efeitos biológicos estocásticos da radiação ionizante com relação à dose.

Figura 5: Possibilidades dos efeitos biológicos estocásticos da radiação ionizante

Com relação aos efeitos biológicos agudos, o órgão humano mais sensível, é o sistema hematopoiético, com possibilidade de contrair anemia e leucopenia com doses limiares de 1Gy.

1.1.2. Surgimento dos princípios básicos da radioproteção (Publicação 22 - CIPR; Publicação 9 - CIPR)

Como evoluiu a denominação do princípio da otimização da proteção radiológica, também conhecido como princípio ALARA

A comunidade da proteção radiológica perguntou à CIPR se *“desde que sejam obedecidos os limites de dose anuais máximos permissíveis, poderíamos ter uma proteção radiológica branda, uma vez que não se justificaria uma proteção mais rigorosa?”* A resposta foi negativa e para isto a CIPR teve que impor um segundo princípio básico, além dos limites anuais de dose, cujo enunciado inicial foi: *“as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto possível”*.

Este enunciado foi logo após abandonado, pois o preço da proteção aumenta exponencialmente com o seu aumento, e então, a partir de um certo valor o custo não justificaria o benefício. Em virtude disso, o enunciado foi mudado para: *“as doses devem ser mantidas em valores tão pequenos quanto praticável”*.

Recentemente este enunciado foi novamente mudado para: *“as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto facilmente exequível”*. Por fim, sofreu uma ulterior modificação para: *“as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto racionalmente exequível”*.

Como a CIPR anteviu a necessidade de se introduzir o princípio básico da justificação

A CIPR anteviu a necessidade de se introduzir o princípio básico da justificação pelo fato de que deveriam ser eliminadas as aplicações da radiação ionizante em atividades que não fornecem um benefício para a população e, portanto, não se justificam.

Os princípios básicos da otimização e da justificativa podem ser definidos como:

- Princípio da otimização: *“as doses devem ser mantidas tão pequenas quanto é racionalmente exequível considerando os aspectos econômicos e sociais”*.
- Princípio da justificação: *“as doses serão justificadas pelos benefícios esperados do procedimento”*.

A CIPR informa que estes princípios da justificação e da otimização já estavam incorporados no parágrafo 47 da publicação nº 9 de 1966.

- Princípio da justificação: o detrimento resultante da limitação da dose deve ser apropriadamente pequeno com relação aos benefícios resultantes do procedimento.
- Princípio da otimização: a limitação deve ser imposta em valores suficientemente pequenos de maneira que qualquer esforço na redução do detrimento não seja justificado pelo esforço necessário para alcançá-lo.

1.1.3. Introdução às grandezas Detrimento e Dose Coletiva (Publicação: Publicação 22 - CIPR)

O que a CIPR entende por detrimento e qual é a equação matemática que o representa

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

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

O que a CIPR entende por dose absorvida coletiva e qual é a equação matemática que a representa

A dose absorvida coletiva, S_k^D , sobre um grupo k constituído de N_k pessoas que receberam cada uma delas, uma dose absorvida média, D_k , é dada por:

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

O que a CIPR entende por dose efetiva coletiva e qual é a equação matemática que a representa

A dose efetiva coletiva, S_k^E , sobre um grupo k constituído de N_k pessoas que receberam, cada uma delas, uma dose efetiva média, E_k , é dada por:

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

A relação entre o detrimento e a dose efetiva coletiva fornece a seguinte equação matemática:

$$G_k = S_k^E \sum_i r_{i,k} g_{i,k}$$

Em que:

- G_k é o detrimento sobre o grupo k de indivíduos
- S_k^E é a dose efetiva coletiva no grupo k de indivíduos
- $r_{i,k}$ é o coeficiente de probabilidade de risco do i -ésimo efeito sobre o grupo k
- $g_{i,k}$ é a gravidade do i -ésimo efeito no grupo k de indivíduos

1.1.4. Discussão do parágrafo 47 da publicação da CIPR nº 9 de 1966, itens a e b (Publicação 22 – CIPR; Publicação 9 – CIPR)

O que a CIPR entende por benefícios tangíveis e intangíveis

Benefícios tangíveis incluem todos os benefícios à sociedade, não se limitando a benefícios específicos a indivíduos ou a grupos de indivíduos, são especificamente identificáveis e, teoricamente, pelo menos sujeitos à quantificação em termos monetários ou outras unidades.

Benefícios intangíveis do mesmo modo dos tangíveis incluem todos os benefícios à sociedade, não se limitando a benefícios específicos a indivíduos ou a grupos de indivíduos e são reconhecidos como contribuindo à satisfação dos desejos humanos, mas não são sujeitos à quantificação formal.

O que a CIPR entende por custos tangíveis e intangíveis

A CIPR entende que os custos são completamente definidos como a soma global de todos os aspectos negativos de uma dada operação, incluindo o valor de todos os produtos e serviços usados na construção, operação, manutenção, inspeção, reposição e encerramento da atividade proposta e de todas as despesas, perdas, obrigações e efeitos adversos induzidos (incluindo danos à saúde e ao ambiente) tanto tangíveis como intangíveis (incluindo qualquer efeito que contribui aos infortúnios humanos)

Levando em consideração os benefícios e os custos tanto tangíveis quanto intangíveis, a análise custo-benefício pode ser definida como aquela que tem o propósito de justificar a presença de uma dada fonte de radiação ionizante, considerando seus efeitos totais positivos e negativos bem como avaliar procedimentos alternativos.

Para o processo de otimização, a CIPR considera a importância relativa dos fatores intangíveis:

- Eles devem ser considerados ainda que seja um julgamento informal e subjetivo
- Eles devem refletir apropriadamente a opinião das pessoas potencialmente afetadas pelos julgamentos.

Considerando-se que o princípio da otimização está baseado na análise custo-benefício diferencial, o seu propósito é verificar se a atividade está sendo executada em valores de radiação (dose) suficientemente pequenos ou, em outras palavras, de detrimento suficientemente pequeno, de modo que qualquer ulterior redução no valor da radiação (dose) não justificaria o incremento no custo para efetua-la.

Com relação ao princípio da otimização, são consideradas as principais informações para comparar as vantagens e desvantagens relativas das medidas que podem ser tomadas para diminuir os valores da radiação (dose):

- Diferença no detrimento de um valor da radiação (dose) para outro valor
- Diferenças nos custos de todos os produtos ou serviços que são necessários para conduzir a atividade proposta em um valor da radiação (dose) em preferência a outro.

A análise custo-benefício diferencial pode ser definida como aquela que tem o propósito de encontrar o menor valor da dose racionalmente exequível e isto é obtido quando o custo para uma ulterior redução na dose não compensa a redução do detrimento obtido.

Links Relacionados:

- [Análise custo-benefício diferencial](#)

1.1.5. Estimativa do custo do detrimento (Publicação 22 – CIPR)

Para estimar o custo do detrimento a CIPR sugere converter as estimativas de risco em estimativas de detrimento expresso em termos monetários, incluindo uma parcela para os fatores intangíveis. O valor monetário para detrimento assume nas estimativas já realizadas um intervalo entre 1.000 a 25.000 dólares por sievert-pessoa.

A equação matemática que representa o princípio da justificação é:

$$B = V - (P + X + Y)$$

Em que

- B é o valor do benefício líquido
- V é o valor do benefício bruto
- P é o custo de produção básico
- X é o custo para alcançar um grau de proteção e segurança relacionado
- Y é o custo do detrimento total causado pela produção, uso e deposição (eliminação) da atividade

Para que a atividade seja aprovada deve-se assumir que Os valores de B devem ser maiores do que zero, isto é, positivos.

Partindo da equação matemática que representa o princípio da justificação, pode ser inferida uma equação que representa o princípio da otimização:

$$B = V - (P + X + Y)$$

Pelo princípio da otimização deseja-se que B seja máximo. Se considerarmos o benefício bruto V e o custo de produção básica P constantes, teremos que B será máximo quando (X+Y) for mínimo. Deve-se impor que seja obedecido o sistema de limitação das doses para todos os indivíduos. O benefício líquido, B, deve ser positivo $B > 0$, de modo que exista sempre um ganho líquido pela comunidade, obtido pela operação ou produto propostos, isto é, obedeça o princípio da justificação, $B > 0$.

No processo de otimização, deve ser obedecido o sistema de limitação de doses quando os benefícios e detrimientos são somados sobre grupos diferentes de indivíduos, isto é, o grupo que recebe o benefício não é exatamente o mesmo que recebe o detrimento.

As equações que representam o processo da otimização a partir da equação que representa a justificação podem ser deduzidas matematicamente pelo conhecimento da disciplina de “cálculo” que informa que para se encontrar os pontos de máximo e mínimo a partir de uma equação matemática basta derivá-la, igualar a derivada a zero e extrair as raízes. Em seguida, derivar a equação mais uma vez, segunda derivada, e introduzir nela as raízes da primeira derivada. Se o resultado for um número positivo teremos um ponto de mínimo e se for negativo teremos um ponto de máximo [figura 6].

Figura 6: Gráfico do custo-benefício

Quando as equações diferenciáveis que representam o processo de otimização não podem ser aplicadas, o impasse é resolvido modificando as equações diferenciais para:

$$-\frac{\Delta X}{\Delta S^{E,c}} \leq \frac{\Delta Y}{\Delta S^{E,c}}$$

Em que o Δ simboliza a descontinuidade da função que foi representada pelo sinal < (menor).

- Exemplo de função contínua: cálculo de espessura de uma blindagem na qual se procura o valor ótimo.
- Exemplo de uma função descontínua: otimização de um sistema de ventilação no qual se procura determinar o número de filtros em sequência para a solução analítica da otimização.

1.1.6. Cálculo simplificado do Valor Alfa pela CIPR (Publicação 22 - CIPR)

Valor de alfa a partir do custo de detrimento $Y_k = G_k \varepsilon$ em que G é o custo do detrimento unitário.

O detrimento G_k no grupo k é expresso pela equação:

$$G_k = S_k^{E,L} \sum_i r_{i,k} g_{i,k}$$

Como: $Y_k = G_k \varepsilon$ vem

$$Y_K = \varepsilon S_K^{E,c} \sum_i r_{i,k} g_{i,k} \quad (1)$$

Por outro lado,

$$Y_k = \alpha S_k^{E,c} \quad (2)$$

em que α é uma constante resultante da equação de custo benefício diferencial, ver figura 5.

Igualando estas duas equações, (1) e (2) vem:

$$\alpha S_k^{E,c} = \varepsilon S_k^{E,c} \sum_i r_{i,k} g_{i,k}$$

ou

$$\alpha = \varepsilon \sum_i r_{i,k} g_{i,k}$$

Links Relacionados:

- [Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR](#)

1.1.7. Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA e Publicação 22 da CIPR (Publicação 22 - CIPR)

Análise custo-benefício diferencial aplicada a uma fonte e a uma população local

Na análise custo-benefício diferencial aplicada a uma fonte e a uma população local a equação matemática que fornece a solução analítica é:

$$\frac{X_A - X_B}{S_{B,k}^{E,c} - S_{A,k}^{E,c}} \leq \alpha$$

em que:

- X_A é o custo de proteção da opção A
- X_B é o custo de proteção da opção B
- $S_{A,k}^{E,c}$ é o compromisso de dose efetiva coletiva da opção A no grupo k
- $S_{B,k}^{E,c}$ é o compromisso de dose efetiva coletiva da opção B no grupo k

A equação deve ser aplicada até que o grau de proteção B iguale o valor de alfa ou se torne maior e neste último caso a solução ótima será a opção de proteção anterior, isto é, aquela que representa a relação mais próxima ao α mas com um valor menor.

Determinação da espessura otimizada de uma blindagem para uma fonte de radiação (Publicação 37 – CIPR)

Na determinação da equação matemática que determina a espessura de uma blindagem plana para uma fonte de radiação, é utilizada a técnica de análise custo-benefício diferencial e as hipóteses utilizadas são:

- a) A taxa de dose efetiva máxima, $\dot{E}_m \leq E_L$ em que $\dot{E}_m$ é a taxa de dose efetiva máxima com uma determinada espessura da blindagem e E_L é o limite de dose anual.
- b) A razão, S, entre a taxa de dose efetiva máxima $\dot{E}_m$ e a taxa de dose efetiva média, $\dot{E}$, permanece constante, com a diminuição da dose.

Cálculo da dose coletiva e do detrimento na população do globo

Não pode ser realizada uma otimização da proteção sobre todas as fontes de radiação do globo terrestre. A otimização só pode ser efetuada individualmente para cada fonte ou conjunto de fontes que se encontrem no mesmo sistema de proteção. O que pode ser determinado são a dose coletiva e o detrimento na população do globo efetuando uma somatória sobre as doses coletivas e detrimentos de cada fonte ou conjunto de fontes otimizadas.

Considerações para a demanda energética futura

Para a futura demanda energética com relação à otimização da proteção, devemos considerar dois casos:

1. As fontes encontram-se em fase de planejamento e, portanto, tanto a fonte como a sua localização já são conhecidas
2. As fontes foram previstas para o futuro, a longo prazo e, portanto, vão depender do desenvolvimento tecnológico e econômico futuro e dessa maneira ainda não foram objeto de uma decisão quanto à sua localização.

Inicialmente deverá ser realizado o que segue:

- No caso “a” a análise custo-benefício diferencial escolheria os grupos de população, N_k , que deveriam ser considerados, identificaria a pessoa representativa para tornar ótima a liberação de material radioativo no ambiente, isto é, determinaria, além de N_k , a E_k^c , a $S_k^{E,c}$ e verificaria se $E_{k, \text{Max}} \leq \text{LAMA}$, isto é, o limite anual máximo permissível.
- No caso “b” identificaria os lugares de localização ótima baseado na otimização da liberação de material radioativo em setores do ambiente, geralmente grandes e com pouca densidade populacional. No estudo global, para ambos os casos, também devem ser considerados outros critérios como o econômico, o social, o político, etc.

Recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA

Limites de dose que o OIEA recomenda para os países afiliados para a população, originada da potência elétrica nuclear instalada atual e futura:

- Uma dose efetiva anual média sobre a população de um país, $\bar{E}_p \leq 0,3 \text{mSv a}^{-1}$ e
- uma dose efetiva máxima anual de 1mSv a^{-1} .

Em virtude da localização de alguns reatores nucleares de potência fornecerem doses coletivas a países vizinhos que não levam os benefícios da produção, o OIEA recomenda aos países afiliados que prevaleçam as normas regulatórias do país onde está instalada a fonte.

Pelas recomendações da CIPR e do OIEA, foram divididas as doses individuais médias anuais em cada país e no globo terrestre com relação às aplicações pacíficas da energia nuclear:

- As doses anuais médias de cada país originadas da potência elétrica nuclear instalada não deve ultrapassar o valor de $0,3 \text{mSv a}^{-1}$.
- As doses anuais médias de cada país originadas de todas as aplicações pacíficas da energia nuclear, exceção feita aos reatores nucleares de potência elétrica, não deve ultrapassar $0,2 \text{mSv a}^{-1}$.
- Os demais $0,5 \text{mSv a}^{-1}$ para se alcançar o limite anual do público sejam deixados para a futura demanda.

Links Relacionados

- [Análise custo-benefício diferencial](#)
- [Custos dos esforços de proteção](#)
- [Distribuição da dose no tempo](#)
- [Introdução às grandezas Detrimento e Dose Coletiva](#)
- [Outros fatores de proteção radiológica pertinentes para o processo de otimização](#)

1.2. Estimativas do Valor Alfa

1.2.1. Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR (Publicação 22 – CIPR; Publicação 37 – CIPR; ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796 EN)

O alfa foi definido como o valor monetário usado para concretizar o detrimento estocástico à saúde, por unidade de dose coletiva.

Em 1984 a CIPR forneceu uma formulação geral para estimar o valor alfa e a partir dela defini-lo baseado no uso da análise custo-benefício na otimização da proteção radiológica. A formulação sugerida é:

$$Y = \alpha S + \sum_j \beta_j N_j f_j (\bar{E}_j)$$

Onde:

α representa o custo por unidade de dose efetiva coletiva

S é a dose efetiva coletiva

β_j representa o custo de outros componentes do detrimento no j-ésimo grupo de indivíduos

N_j é o número de indivíduos do j-ésimo grupo

f_j é uma função das doses efetivas individuais

$\bar{E}_j$ representa a dose efetiva média dos N_j indivíduos do j-ésimo grupo

O valor alfa pode ser representado em termos do i-ésimo efeito biológico por um produto de dois termos e uma somatória sobre os j's efeitos biológicos pela equação:

$$\alpha = \sum (\text{probabilidade do i-ésimo efeito}) \times (\text{custo do detrimento associado ao dano do i-ésimo efeito})$$

Portanto ele é formado de dois termos denominados de “probabilidade do efeito” e “custo do efeito”.

Links Relacionados

- [Valor monetário da dose coletiva unitária: valor alfa](#)

1.2.2. Probabilidade do efeito: principais propósitos para definir o detrimento e recomendações da CIPR (Publicação 74 – CIPR)

O detrimento deverá ser definido principalmente para os seguintes propósitos:

1. Para recomendar os limites de dose
2. Para recomendar os fatores de ponderação do tecido
3. Para quantificar o valor da dose coletiva unitária a ser usada nos estudos da otimização

A CIPR concluiu que os muitos aspectos do detrimento e os seus múltiplos propósitos torna a seleção de uma única abordagem indesejável. Com relação à otimização não fornece nenhuma recomendação.

1.2.3. Principais métodos para o cálculo do custo atribuído ao detrimento da saúde (Publicação: ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796 EN)

Os principais métodos para o cálculo do custo atribuído ao detrimento da saúde são:

- Capital humano
- Princípio da compensação legal
- Analogias aos prêmios angariados por seguro
- Inferência pública ou preferência revelada
- Disposição a pagar: DAP

Método do capital humano

É calculado considerando unicamente a produção potencial que é perdida pela sociedade causada pela morte prematura do indivíduo. Esta metodologia peca por ser puramente econômica, não permitindo a inclusão de qualquer outro valor mais subjetivo, como danos morais, isto é, o desgosto, a dor e o sofrimento tanto da vítima como dos familiares ou amigos.

Princípio da compensação legal

Os defensores desta metodologia argumentam que a discussão da recompensa imposta pelos tribunais pela fatalidade industrial reflete, de algum modo, a visão da sociedade. Ainda assim esse método apresenta alguns inconvenientes:

1. O prêmio pela morte prematura recompensa unicamente os parentes
2. É considerada incompleta e preconcebida por ter sido julgada improcedente
3. A habilidade de provar negligência pode alterar completamente a compensação – se nenhuma negligência pode ser compartilhada, então não pode ser dada nenhuma compensação e quando pode ser comprovada uma negligência excepcional, podem ser pedidas compensações excepcionais com propósitos punitivos, particularmente quando tem sido considerável a perda de vida.
4. As atividades legais existem para compensar “até onde o dinheiro pode” e, portanto, podem subestimar o custo total.

A Comissão Real do Reino Unido examinou as falhas na legislação britânica e concluiu que os prêmios do tribunal não refletem necessariamente a visão da sociedade sobre compensações.

Analogia aos prêmios angariados por seguro

Apresentam alguns inconvenientes:

1. Não apresentam nenhum efeito direto sobre o risco de mortalidade, mas meramente cobrem as consequências da morte, compensando outros.

2. Os prêmios do seguro tendem a refletir o interesse das pessoas para com seus dependentes, ao invés de fazer uma avaliação de sua própria vida.

Inferência pública ou preferência revelada

Esta metodologia está baseada nas análises retrospectivas de decisões sobre a proteção que já tenha sido implementada e na avaliação de quanto já foi gasto para reduzir o risco. É definida pelos políticos com o argumento de que são os representantes da sociedade e que, portanto, em suas decisões está implícito “um valor de vida” socialmente aceitável.

Metodologia da disposição a pagar, DAP

O cálculo está baseado na avaliação de quanto os indivíduos estão dispostos a pagar para evitar uma pequena alteração no risco. Os principais defensores são os economistas que julgam ser a metodologia teoricamente mais consistente. O principal problema reside na comunicação ao entrevistado do significado do risco.

Links Relacionados

- Valor monetário da dose coletiva unitária: valor alfa

1.2.4. Abordagem do Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA (Publicação: ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796 EN)

Hipóteses usadas pelo Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA, para representar o impacto da perda de vida esperada resultante de uma dose coletiva de 1 Sv-pessoa:

- A perda média de vida sadia causada por um câncer letal induzido pela radiação
- A perda média de vida provocada por uma enfermidade hereditária
- O fator de risco de câncer por Sv-pessoa
- O fator de risco para a indução de dano hereditário para todas as gerações por Sv-pessoa

Calcula-se a perda de vida esperada causada por 1 Sv-pessoa multiplicando a probabilidade de contrair um efeito somático ou hereditário pela perda de vida esperada por estes efeitos.

O OIEA sugere que o valor alfa seja o resultado do produto interno bruto anual per capita multiplicado pela perda de vida esperada causada por 1 Sv-pessoa somado de um custo do cuidado médico extra por sv-pessoa. A equação representativa é:

$$\alpha = V_p \cdot \text{PIB}_{\text{anual per capita}} + C$$

em que:

V_p é a perda de vida esperada causada por 1 Sv-pessoa

C é o custo extra de cuidado médico

1.2.5. Abordagem da Junta Nacional de Radioproteção (National Radiation Protection Board) da Inglaterra (Publicação: ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796 EN)

Os quatro componentes utilizados pela Junta Nacional de Radioproteção da Inglaterra para o cálculo do valor alfa são:

1. Custo esperado pelo detrimento hereditário
2. Perda esperada de produção causada por cânceres não fatais
3. Perda esperada de produção causada por morte prematura
4. Gastos médicos esperados pela indução de cânceres

1.2.6. Abordagem do Centro de Estudos sobre a Avaliação da Proteção no Domínio Nuclear (Centre d'Études sur L'Évaluation de La Protection dans le Domain Nucléaire) da França (Publicação: ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796 EN)

Pela abordagem do Centro de Estudos sobre a Avaliação da Proteção no Domínio Nuclear da França, o valor alfa é avaliado com duas partes distintas denominadas de α_1 e α_2 e somadas.

- α_1 é o resultado do produto do fator de risco por Sv-pessoa multiplicado pelo valor da vida V_1 .
- α_2 é o resultado do produto do fator de risco para cânceres não fatais multiplicado pelo produto interno bruto médio trimestral per capita.

1.2.7. Exemplos de Valores monetários usados para a dose coletiva unitária (Publicação: Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, o conceito de se atribuir um valor monetário a um sievert-pessoa é unicamente recomendado e não compulsório. Entretanto, um levantamento das praticas em nível internacional demonstrou que o conceito de se atribuir um valor monetário a um sievert-pessoa está enormemente difundido entre os operadores e as autoridades regulatórias. O ANEXO III da Serie de Relatórios de Segurança 21 do OIEA traz exemplos dos diferentes valores de alfa nos diversos países:

- TABELA 1: Valor monetário de um sievert-pessoa recomendado por diferentes autoridades
- TABELA 2: Valor monetário de um sievert-pessoa usado por diferentes Instalações (valores singulares)
- TABELA 3: Valor monetário de um sievert-pessoa usado por diferentes instalações (sistema de valores dependendo da dose individual anual)

Links Relacionados

- [Cálculo simplificado do Valor Alfa pela CIPR](#)
- [Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR](#)
- [Mudança de filosofia para o critério alfa: função variável baseada na dose individual máxima](#)

TABELA 1: Valor monetário de 1 Sv-pessoa recomendado por diferentes autoridades

Pais (ano)	Valor Monetário de um sievert-pessoa em moeda nacional	Valor monetário de um sievert-pessoa em USA\$
Canadá (1997)	Can \$ 100.000 estabelecido com base em referencias internacionais	75.000
Republica Checa (1957)	CZK 500.000-5.000.000, dependendo do valor das doses individuais e da situação de exposição	17.000-170.000
Finlândia (1991)	US\$ 100.000 valor comum para todos os países nórdicos	100.000
Grã-Bretanha (1993)	£ 10.000 a 100.000, dependendo da situação de exposição (não da planta especificada) e do valor das doses individuais	17.000-170.000
Holanda (1995)	NLG 1.000.000	500.000
Romênia	US\$ 220.000	220.000
Suécia (SSI)1992	SEK 400.000 a 2.000.000	55.000-270.000
Suíça (1994)	CHF 3.000.000	3.000.000
EUA (NCR) 1995	US\$ 200.000	2000.000

NOTAS: 1 US\$= Can \$ 1,33; CZK 30; £ 0,6; NLG 2; SEK 7,5; CHFI (Como era em 1998) SSS: Svedish Radiation Protection Authority. NRC: Nuclear Regulatory Commission

TABELA 2 - Valor monetário de 1 Sv-pessoa para diferentes Instalações (valores singulares)

Pais	Instalação	Ano de Adoção	Valor monetário de um sievert-pessoa em moeda Nacional	Valor monetário de um sievert-pessoa em US\$
Canadá	Gentilly	-	Can\$ 1.000.000	750.000
Romênia	Cermavoda	2000	US\$ 220.000	220.000
Slovenia	Krsho	1996	US\$ 700.000	700.000
África do Sul	Koeberg	1993	US\$ 1.000.000	1.000.000
Espanha	Asco Vandellos	1994 1982	US\$ 2.000.000 ESP 100.000.000	2.000.000 700.000
Suécia	Valor Comum a todas as instalações	1992	SEK 4.000.000	550.000
EUA	Valor por instalação para 90% dos reatores	1990-1991 em geral 1953-1997 para as maiores valores	Valor mínimo: US\$ 500.000 valor Maximo US\$ 2.810.000 valor médio: US\$1.200.000 valor mediado US\$ 1.000.000	Valor mínimo: 500.000 valor Maximo 2.810.000 valor médio 1.200.000 valor mediado 1.000.000

NOTAS: 1US\$ = Can \$1,33, ESP 150, SEK 7,5 (como em 1998)

TABELA 3 - Valor monetário de 1 Sv-pessoa para diferentes instalações baseado na dose individual anual

Pais	Instalação	Ano de Adoção	Valor monetário de um sievert-pessoa em moeda nacional	Valor monetário de um sievert pessoa em US\$
Bélgica	SCK-CEN	1995	<1mSv: B.Fr 1.000.000 1-2 mSv: BFr 2.500.000 2-5 mSv: BFr 10.000.000 5-10 mSv: BFr 25.000.000 10-20 mSv: BFr 50.000.000 20-50 mSv: BFr 200.000.000	<1mSv: 27.000 1-2 mSv: 67.000 2-5 mSv: 267.000 5-10 mSv:667.000 10-20 mSv: 1.333.000 20-50 mSv: 5.333.000
Canadá	Darlington: sistema dependente da categoria dos trabalhadores	-	A partir de alguns milhares de Can \$ ate Can \$ 2.000.000 Exemplo trabalhadores em geral: Can\$ 200.000, equipe de manutenção do reator Can \$ 500.00	A partir de alguns milhares de US\$ até 1.500.000 Exemplo: trabalhadores em geral: 150.000, equipe de manutenção do reator: 1.130.000
França	Electricité da França	1993	1. mSv: FFr 100.000 1-5 mSv: FFr 500.000 5-15 mSv: FFr 2.300.000 15-30 mSv: FFr 6.700.100 30-50 mSv: FFr 15.000.000	0-1 mSv: 17.000 1-5 mSv: 83.000 5-15 mSv: 383.000 15-30 mSv: 1.117.000 30-50 mSv: 2.500.000
Alemanha	Proposta do VGB sob teste pelas instalações	1996	< 1mSv: nenhum valor 1-10 mSv: DM 300.000 10-20 mSv valor linearmente crescente até alcançar DM 3.000.000 em 20 mSv:	< 1mSv: nenhum valor 1-10 mSv: 170.000 12-20 mSv valor linearmente crescente até alcançar DM 1.695.000 em 20 mSv:
Holanda	Borselle	1992	< 15 mSv, NLG 1.000.000 >15 mSv; NLG 2.000.000	< 15 mSv 500.000 >15 mSv: 1.000.000
Espanha	Confrontes: sistema de valores dependentes do valor da dose coletiva anual	1994	< 3 Sievert-pessoa por reator por ano sobre uma media de 3 anos ESP 100.000.000 > sievert-pessoa por reator por pessoa sobre uma media de 3 anos ESP 150.000.000	73 sieverts-pessoa por reator por ano sobre uma media de 3 anos 667.00 < 3 sievert-pessoa por reator por ano sobre uma media de 3 anos: 1.000.000
UK	Sizewell	-	Para os trabalhadores a NRPB estabeleceu: entre £10.000 e £50.000	Para trabalhadores a NRPB estabeleceu entre 17.000 e 85.000
EUA	South Texas	1993	< 10 mSv, US\$ 500.000 > 10 mSv, US\$ 2.500.000	< 10 mSv, US\$ 500.000 > 10 mSv, US\$ 2.500.000

NOTAS: 1US\$ = BFr 37,5; Can \$1.33; F.Fr, 6; DM 1,77; NLG 2; ESP 150 £0,6 (como em 1998) SCK-CEN. Studiecentrum voor kernewigie Centre d' étude de L'Energie Nucleaire VGB: Zecnische Vorainigung der Grosskraftwerkbettreiber. NRPB: National Radiological Protection Board.

1.3. Novos Estudos Sobre o Valor Alfa

1.3.1. O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica. (Publicação 74 – CIPR; The Alpha Value Decrease With the Decrease of Individual Annual Effective Dose)

O autor do trabalho com o título “The Alpha Value Decrease With the Decrease of Individual Annual Effective Dose” atribui o sofisma de que o valor α diminui com o decréscimo da dose individual ao fato de que estão o apoiando na filosofia assumida pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR, da linearidade entre dose e efeito, isto é, a cada incremento na dose de radiação está associado um incremento proporcional no risco de um efeito deletério à saúde mas, na realidade, o valor de alfa não está associado a esta curva.

Percepção teórica:

1. Intervalos de doses individuais que a CIPR considera, valores extremos e em quais se aplica o processo ALARA.

De acordo com a CIPR são consideradas três regiões, a saber:

- Região aceitável, doses individuais $\leq 5\text{mSv a}^{-1}$
- Região tolerável, doses individuais $> 5\text{mSv a}^{-1}$ até 50mSv a^{-1}
- Região inaceitável, doses individuais $> 50\text{mSv a}^{-1}$

O processo ALARA se aplica na região tolerável.

2. Técnicas de ajuda para tomada de decisão

Fazem uso explícito do valor alfa as técnicas: custo-benefício diferencial, custo-benefício integral e custo-benefício expandido.

3. Como foi escolhido o valor de 3/10 do limite anual?

A CIPR decidiu subdividir a região tolerável em duas, estabelecendo o valor de 3/10 do limite anual para o decréscimo da dose individual, numa primeira instância e a 1/10 do limite anual numa segunda instância.

Foi constatado na época que os institutos dedicados ao desenvolvimento das aplicações para fins pacíficos das radiações ionizantes tinham todos eles, independentemente de suas dimensões, uma distribuição similar nas doses individuais dos trabalhadores, notaram que independentemente do número de fontes, de 1,5% a 3% dos trabalhadores recebiam doses superiores a 3/10 dos limites anuais. Por ser este um número muito pequeno com relação ao total de trabalhadores e, portanto, termos um número pequeno de locais para efetuar as melhorias de proteção, foi considerado um valor adequado para, em uma primeira instância, se dar prioridade a eles. Neste caso os custos não deveriam ser muito elevados, pois só abraçariam situações peculiares e em número reduzido.

4. Exemplo com referência à estatística de distribuição de doses individuais

O autor do trabalho lembra que por sugestão do Dr. Walter Stephen Snyder comparou a estatística de distribuição das doses individuais do IPEN com aquelas do Oak-Ridge National Laboratory dos Estados Unidos, cerca de dez vezes maior em número de trabalhadores mas com tipos de fontes similares ainda que em número muito maior. O resultado foi distribuição de doses similares durante os três anos pesquisados.

5. Por que foi deixada para uma segunda fase a redução das doses individuais de 3/10 dos limites anuais para 1/10?

- Teríamos adquirido experiência na 1ª fase e poder-se-ia julgar se é justificável em termos de custo uma ulterior redução a 1/10 dos limites anuais.
- O universo dos trabalhadores que era de 1,5% a 3% na primeira fase aumentaria para 40% ou mais e, portanto, o número de situações e locais que demandariam melhorias seria muito grande e o custo poderia tornar-se injustificável.

Links Relacionados

- [Análise custo-benefício diferencial](#)
- [Análise custo-benefício expandida](#)
- [Análise custo-benefício integral](#)
- [Distribuição da dose no tempo](#)
- [Surgimento dos princípios básicos da radioproteção](#)

1.3.2. O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Exemplo da pequena mina utilizada na publicação 55 da CIPR (Publicação 55 - CIPR; Publicação 74 - CIPR; The Alpha Value Decrease With the Decrease of Individual Annual Effective Dose)

Como o autor do trabalho prova que o valor alfa aumenta com o decréscimo da dose individual no exemplo da pequena mina utilizada na publicação 55 da CIPR:

O autor verificou em que intervalo de valor alfa cada uma das 5 opções de proteção permaneceria como solução analítica. Para tanto fez uso da equação $(X + \alpha S)_{\min}$, igualando-as para duas opções de proteção sucessivas. O resultado foi um aumento do valor alfa com o decréscimo da dose individual.

Como o autor do trabalho prova que o valor alfa aumenta com o decréscimo da dose individual no exemplo da determinação da espessura otimizada de uma blindagem plana para uma fonte de radiação apresentada na publicação nº 37 da CIPR:

Fazendo uso do resultado do exercício apresentado na publicação em apreço o autor muda o valor de alfa de U\$10.000,00 para U\$5.000,00 e verifica que a espessura encontrada não é metade daquela apresentada com o valor alfa de U\$10.000,00. Também, mostra que se for realizada uma segunda otimização com o mesmo valor de alfa de U\$10.000, a espessura encontrada é muito inferior à primeira, e não igual.

O autor fornece outro exemplo envolvendo a camada semi-redutora para demonstrar que o valor de alfa aumenta com o decréscimo da dose individual:

O autor supôs uma camada semi-redutora de 1 cm e mostrou que ela reduzia a dose de 1.024 mSv para 512 mSv, portanto seria evitada uma dose de 512 mSv. Porém, com a mesma camada semi-redutora, com uma dose de 2 mSv, nós a reduziríamos a 1 mSv. Portanto no primeiro caso reduziríamos a dose de 512 mSv, e no segundo caso apenas de 1 mSv, ambos ao mesmo preço.

Links Relacionados

- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

1.3.3. O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Aumento do valor alfa em função da geometria da blindagem (Publicação 74 – CIPR; The Alpha Value Decrease With the Decrease of Individual Annual Effective Dose)

O autor do trabalho prova que o valor alfa aumenta com o decréscimo da dose individual no exemplo em que ele considera a geometria da blindagem:

O autor supôs que a fonte permanece armazenada em uma blindagem esférica e que a camada semi-redutora da fonte é de 1 cm de chumbo. Partindo destas hipóteses demonstra que à medida em que se acrescentam as camadas semi-redutoras, as doses na superfície da blindagem diminuem, mas os valores de alfa aumentam.

Conclusão que o autor do trabalho aufer se a blindagem de uma fonte de radiação não tiver geometria esférica com relação ao valor de alfa em função da dose individual:

O autor mostra que neste caso o valor de alfa aumentará ainda mais com relação à blindagem esférica em virtude de existir material blindante em excesso em determinados locais dependendo da forma geométrica, como cúbica, paralelepílica, cilíndrica, etc.

1.3.4. Análise de sensibilidade: Argumento da linearidade entre as diferentes opções de proteção radiológica (Sensitivity Analysis: The Linearity Argument Between The Different Radiological Protection Options)

Procedimento correto exigido para a diminuição das doses individuais dos trabalhadores

De antemão deve-se analisar as opções de proteção radiológica plausíveis e disponíveis e em segundo lugar estimar o custo de implementação de cada uma delas.

A cada opção de proteção radiológica está associada uma dose individual máxima prevista que pode ser representada por um custo de detrimento.

Deve-se supor que quanto maior for o custo da opção de proteção radiológica considerada, menor será a dose recebida pelo trabalhador e desta maneira menor será o custo do

detrimento, caso contrário, a opção será eliminada, fazendo uso da simples técnica de custo-eficácia.

Relação matemática que representa o valor de alfa conforme a CIPR:

$$\alpha = \Delta X / \Delta S$$

Onde:

- ΔX representa o aumento no custo para ir de uma opção de proteção radiológica para a seguinte
- ΔS representa o decréscimo na dose coletiva para as duas opções de proteção consideradas.

Esta equação é denominada custo-eficácia.

Sugestões para a determinação do valor de alfa para cada opção de proteção

1. O que sugere a CIPR:

A CIPR supõe uma relação linear (segmentos de reta) unindo as várias opções de proteção, isto é,

$$X = f(S) \text{ linear}$$

em que:

- X representa o custo de proteção
- S representa a dose coletiva

2. O que sugerem os autores do trabalho em apreço:

Os autores do trabalho em estudo sugerem uma curva que melhor se adapte à união das várias opções e determinar o valor de alfa pela derivada desta curva no ponto de opção considerada.

No caso do exemplo da pequena mina de urânio considerado na publicação nº 55 da CIPR, foram ensaiadas as seguintes curvas: linear, polinomial, logarítmica, exponencial e potencial. O resultado da melhor curva foi a potencial.

Links Relacionados

- [Análise custo-eficácia](#)
- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

1.3.5. Otimização da proteção radiológica usando derivadas (Publicações: Radiological Protection Optimization using Derivatives; Una Reflexión sobre el Valor Alfa)

A distribuição das doses individuais é um fator importante na otimização da proteção radiológica porque a otimização dela visa diminuir as doses individuais até alcançarem a região considerada aceitável.

No exemplo da pequena mina de urânio, os autores do trabalho em apreço, aplicaram as técnicas de ajuda de tomada de decisão denominadas de análise custo-benefício e análise custo-benefício expandido quando introduziram a função potencial unindo as opções e a sua derivada. Encontraram para a solução analítica os mesmos resultados da CIPR usando as funções lineares e supra lineares.

Quando, no exemplo da pequena mina de urânio, utilizaram a função potencial unindo as opções e a sua derivada para a determinação da solução analítica chegaram às seguintes conclusões:

1. Que a função do custo do detrimento, Y , é desnecessária se o valor de alfa for conhecido, pois sua derivada é o próprio valor de alfa. Então o que importa é a derivada $-\Delta X/\Delta S$ nos valores das opções que, juntamente com o valor de alfa, fornece a opção ótima.
2. Que o elemento prevalecedor na relação da opção ótima é o valor de alfa e que a seleção de um único valor, como sugerido normalmente pela CIPR, não é tão eficaz para a otimização. Se fosse usada uma curva para valores de alfa, bem como a técnica das derivadas, a solução analítica para as questões de otimização certamente será mais eficaz e confiável do que usar um único valor, como é feito atualmente.

Links Relacionados

- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)
- [O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica](#)

1.3.6. Mudança de filosofia para o critério alfa: função variável baseada na dose individual máxima (Publicações: Change in the Alpha Criterion Policy: Variable based on the Maximum Individual Dose Function; How we can Transform the Constant Alpha Value in a Variable Function)

Os diferentes valores de alfa nos processos de otimização da proteção radiológica determinam a velocidade e decréscimo das doses individuais. Maiores valores de alfa exigem um menor número de processos de otimização para se alcançar a região aceitável das doses individuais.

Conflito antevisto entre os diferentes valores de alfa de cada país e o risco à saúde associado a cada prática envolvendo radiação ionizante:

O risco associado a cada prática que envolve a radiação ionizante e a finalidade do valor alfa, que é o decréscimo das doses individuais a valores aceitáveis, são os mesmos em qualquer parte do mundo e portanto não justificam a pletora de valores alfa.

Fatos desfavoráveis introduzidos atando o valor de alfa constante ao produto bruto anual, PBA, per capita:

A restrição de dose de cada prática ou classe de trabalhadores admite diferentes valores para cada país em função do valor alfa adotado e portanto diferentes velocidades de decréscimo das doses individuais em função do tempo. Este fato pode produzir conflitos legais internacionais como, por exemplo, em uma permuta de trabalhadores. Se o trabalhador de uma instituição vai para outro país onde a restrição de dose é maior do que aquela do próprio país e se ele adquire um câncer durante o seu período normal de trabalho, em uma ação judicial a primeira pergunta que será feita ao empregador deste trabalhador será:

Por que o empregado foi enviado para um país que não fornece as mesmas condições de proteção que são oferecidas no nosso país?

Fazendo uso da equação $dY/dS^{E,c} = \alpha$ e a probabilidade de morte fornecida pela CIPR, qualquer um pode calcular o custo da vida humana de seu país, contrariamente ao que a CIPR e o OIEA preconizam.

Para evitar os fatores desfavoráveis introduzidos pela determinação do valor alfa constante atado ao produto bruto anual per capita, os autores do presente trabalho sugerem modificar o valor alfa constante para um valor alfa variável função da dose efetiva máxima dos envolvidos que vai representar a distribuição das suas doses individuais e utilizar as técnicas de custo-benefício baseadas nas derivadas da curva que melhor descreve os custos dos detrimientos provocados pelas opções disponíveis. Os autores do trabalho sugeriram para o valor alfa uma função da dose efetiva máxima e o uso de sua derivada. Utilizaram o exemplo da pequena mina de urânio da publicação nº 55 da CIPR aplicando a técnica de análise de custo-benefício expandida e a dose individual máxima foi dividida em cinco valores. As doses efetivas individuais máximas foram divididas em quatro intervalos e para descrevê-los foram utilizadas as seguintes equações: constante, linear, quadrática e exponencial.

Os autores julgam que a curva que descreve o valor alfa deveria ser escolhida pelo OIEA ouvindo os países membros e como base deveriam considerar o tempo desejável para se alcançar a região aceitável das distribuições das doses individuais. Com a proposta do valor alfa ser uma função contínua da dose efetiva individual máxima, os autores chegaram às seguintes conclusões:

1. Que a distribuição das doses individuais será sempre um fator a ser considerado contrariamente ao que pressupõem as técnicas de análise custo-benefício diferencial e integral.
2. O uso das derivadas do custo de proteção anual vinculadas a uma curva em função do valor de alfa demanda pouco trabalho com relação ao valor alfa constante quando se aplicam as técnicas de análise custo-benefício tanto diferencial quanto integral ou expandida.

3. Os riscos associados às práticas envolvendo a radiação ionizante e o objetivo final de decrescer as doses efetivas anuais a valores desejáveis são os mesmos em qualquer lugar do planeta e portanto, em termos globais, deveria existir uma uniformidade internacional na filosofia adotada para descrever estas doses.

Links Relacionados

- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)
- [Exemplos de Valores monetários usados para a dose coletiva unitária](#)
- [O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica](#)
- [Técnica de ajuda para tomada de decisão: custo-benefício](#)
- [Técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão](#)

2. OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

2.1. Otimização e Tomada de Decisão em Proteção Radiológica

2.1.1. Introdução (Publicação 55 – CIPR)

A otimização da proteção radiológica deve responder a uma pergunta básica:

Será que fiz tudo que eu poderia racionalmente ter feito afim de reduzir estas doses de radiação?

Em 1955, a CIPR recomendou que deveriam ser realizados todos os esforços para reduzir a irradiação causada por todos os tipos de radiação ionizante aos menores níveis possíveis

Ainda que os valores propostos para as doses máximas permissíveis sejam tais que envolvam um risco pequeno comparados com os outros perigos de vida, existem evidências incompletas sobre as quais estes valores foram baseados e ainda tem-se o conhecimento de que alguns efeitos da radiação são irreversíveis e cumulativos.

Links Relacionados

- [Surgimento dos princípios básicos da radioproteção](#)

2.1.2. Opção de proteção (Publicação 55 – CIPR)

Trata-se de um projeto específico de proteção ou um conjunto de procedimentos operacionais específicos.

Caso básico no processo de otimização de proteção radiológica

Entende-se como o ponto de partida (opção de proteção inicial) para a avaliação das alterações propostas.

Exemplos: em estudos de projetos pode ser a opção de proteção mais barata e em estudos operacionais, o conjunto de procedimentos em uso.

Custo da opção de proteção

O custo financeiro direto e recursos da opção, junto com quaisquer outros custos, por exemplo, o treinamento.

Desempenho da opção de proteção

São os resultados fornecidos por ela, tanto na aplicação de uma opção de projeto quanto na de um conjunto de procedimentos operacionais específicos.

Fator ou atributo no processo de otimização da proteção

É uma medida identificada do custo ou do desempenho. Exemplos: custo financeiro, dose coletiva, dose individual máxima, exigências de treinamento, desconforto causado pela roupa protetora etc.

Critério no processo de otimização da proteção

É uma medida quantitativa ou qualitativa do que é aceitável ou desejável para um ou mais fatores. É a base contra a qual o desempenho ou o custo de uma operação pode ser comparada. Exemplos: limites de dose individuais, um valor especificado da dose coletiva.

Fatores de proteção radiológica e outros fatores no processo de otimização da proteção

Entende-se por fatores de proteção radiológica aqueles que estão relacionados com o grau de proteção a ser obtido e por outros fatores aqueles que, estando relacionados ou descrevendo o desempenho ou ainda o custo de uma opção de proteção, não estão relacionados com o grau de proteção a ser obtido.

2.1.3. Técnica de ajuda para tomada de decisão: custo-benefício (Publicação 55 – CIPR)

Qual é a técnica de ajuda para tomada de decisão mais simples usada em proteção radiológica e por que ela nem sempre é aceita?

A técnica de ajuda para tomada de decisão mais simples é a custo-benefício. Ela nem sempre é aceita quando forem necessários outros fatores além da dose coletiva e custo de proteção, por ser o problema da proteção radiológica mais complexo, a decisão também é complexa.

O compromisso de dose coletiva como única medida do detrimento da radiação implica em igualdade precisa entre a dose coletiva no trabalhador e no público. Entre as doses coletivas resultantes de um grande número de doses pequenas e de um pequeno número de doses relativamente grandes; entre doses coletivas resultantes de doses individuais que são 10% ou 90% do limite apropriado. Quando estes dados forem igualmente aceitáveis o modelo mais simples custo-benefício é adequado, caso contrário são necessários fatores de ponderação.

Como exemplo poder-se-ia dar a compra de um carro. Nesse caso, os fatores a serem considerados são: preço, custo de manutenção, consumo de combustível e preço de revenda após o período de uso. Deve-se também levar em conta um critério: a verba disponível. Nesse caso a técnica custo-benefício resolve mas se levarmos em conta também: a aceleração desejada, a velocidade máxima, a cor, a qualidade do som, a técnica custo-benefício não será suficiente.

Quais são os critérios que sempre devem ser utilizados na aplicação da técnica custo-benefício no processo de otimização da proteção?

Os critérios são dois, a saber:

- O valor alfa

- Os limites de dose anuais tanto para os trabalhadores como para o público, se estes últimos estiverem envolvidos.

Os limites autorizados são sempre critérios em um processo de otimização da proteção radiológica subsequente?

Não, desde que este novo processo de otimização provasse que o ótimo revisado é muito diferente dos limites autorizados. Estes últimos unicamente formariam uma base a ser considerada para a necessidade de alterá-los, porém eles permaneceriam válidos até surgirem os revisados.

Links Relacionados

- [Abordagem do Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA](#)
- [Dose coletiva](#)
- [Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR](#)
- [O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica](#)
- [Principais indicadores da eficácia do monitoramento de um plano ALARA](#)
- [Valor monetário da dose coletiva unitária: valor alfa](#)

2.1.4. Procedimento de otimização de Proteção Radiológica aplicado ao projeto e à operação (Publicação 55 – CIPR)

Procedimento da otimização da proteção aplicado a um projeto

Em um procedimento da otimização da proteção aplicado a um projeto, as opções de proteção devem ser identificadas a partir do momento que se tem as primeiras ideias acerca de uma nova tarefa, pois o projetista passa a estar ciente da necessidade de se avaliar alternativas aos objetivos gerais e aos critérios.

Desta maneira as necessidades de proteção radiológica entrarão na concepção original ao invés de serem adições ou modificações posteriores.

Procedimento de otimização da Proteção Radiológica aplicado à operação

Dentre os fatores que poderiam ser variados em um procedimento de otimização da proteção aplicado às operações, pode-se citar:

- Efeito da blindagem na redução da taxa de dose nos locais a serem ocupados por pessoas
- Frequência ou extensão do monitoramento para o controle das doses
- Procedimentos gerenciais
- Programa de treinamento
- Procedimentos para o controle das descargas rotineiras de material radioativo no ambiente

As opções de proteção que não obedecem aos critérios estabelecidos tanto para a otimização de projeto como de operação da instalação devem ser descartadas, mas não eliminadas, pois podem ser reconsideradas mais tarde, dependendo do resultado preliminar do procedimento de otimização.

Links Relacionados

- [Diferentes passos a serem executados em um estudo de otimização](#)
- [Estádio do projeto](#)

2.2. Técnicas de Ajuda Para Tomada de Decisão

2.2.1. Exemplo da pequena mina de urânio (Publicação 55 – CIPR)

Sistema de ventilação para proteger os trabalhadores em uma pequena mina de urânio

Projeto de um sistema de ventilação para instalação radiativa, composta por três ambientes de trabalho. Foram identificadas vinte e cinco opções possíveis, cada uma das quais é caracterizada por uma vazão de ar primária, uma vazão de ar secundária, e a presença ou ausência de um ventilador em cada curva da galeria. O ventilador ajuda a reduzir a estagnação do ar. O fluxo de ar secundário introduz ar no ambiente, enquanto que o fluxo de ar primário retira o ar do ambiente. A TABELA 4 apresenta os valores para os parâmetros que definem cada opção junto com os custos e as doses coletivas associadas a cada opção.

São 17 mineiros divididos em 3 grupos de acordo com seu grau de ocupação nas várias regiões da mina (galerias ou locais de permanência) e portanto foram divididos em função de suas doses individuais.

- Grupo 1: 4 mineiros mais irradiados (perfuradores trabalhando nos locais de permanência).
- Grupo 2: 4 mineiros com irradiações intermediárias.
- Grupo 3: 9 mineiros com irradiações menores.

Na TABELA 5 as opções foram caracterizadas em função das taxas de fluxo primário e secundário dentro da mina e do uso de ventilador suplementar para evitar a estagnação do ar no fundo do saco, *cul-du-sac*, em cada local de permanência. Existe também um grau de desconforto para cada opção.

A TABELA 6 apresenta as doses individuais médias dos mineiros em cada grupo para o caso base e para as opções. A TABELA 7 apresenta os custos anuais e doses coletivas anuais associadas, para cada opção. A TABELA 8 traz o resumo das tabelas anteriores. As doses estimadas são nominais e apresentam consideráveis incertezas causadas pela dificuldade de se estimar a dose equivalente efetiva pela medida do radônio. As diferenças entre as doses são menos afetadas por estas incertezas e a tendência destas diferenças são ainda menos afetadas. Neste exemplo, os mesmos fatores e critérios são analisados por meio de diferentes técnicas. A utilidade de uma análise de sensibilidade em um processo de otimização da

proteção radiológica é permitir identificar a robustez da solução analítica com relação a cada fator ou critério utilizado no processo de otimização. Os fatores pertinentes são:

- dose coletiva laboral anual originada pela radiação gama externa e pela inalação de partículas de urânio e filhos do radônio ;
- custo de proteção anualizado;
- distribuição das doses individuais laborais;
- desconforto associado à taxa de ventilação nas galerias e locais de permanência.

O último deles é um fator de proteção radiológica uma vez que diferentes taxas de ventilação correspondem à diferentes doses. O desconforto provocado por um sistema de ventilação pode ser considerado um fator de proteção em um ambiente em que há presença de radiação ionizante quando tivermos no ambiente gases ou pós suspensos no ar pois diferentes taxas de ventilação provocarão diferentes doses. Para cada técnica de análise foram estabelecidos critérios. Um critério comum a todas as técnicas de análise é aquele relacionado ao custo e à dose coletiva unitária.

TABELA 4: Exemplo da mina de urânio: valores, custos e doses coletivas para cada opção

Opção	Vazão de ar (m ³ s ⁻¹)		Uso de ventilador	Custo unitário (r\$)	Dose Coletiva (Sv.pessoa)
	Primária	secundária			
0	10	2	Não	0	0,686
1	20	3	Não	10400	0,561
2	20	3	Sim	11700	0,561
3	20	5	Não	13700	0,581
4	20	5	Sim	15000	0,570
5	20	11	Não	16900	0,561
6	30	3	Não	17200	0,357
7	20	1	Sim	18200	0,357
8	30	3	Sim	18500	0,335
9	30	5	Não	20500	0,338
10	30	5	Sim	21800	0,351

11	30	11	Não	23700	0,337
12	30	11	Sim	25000	0,335
13	60	3	Não	30900	0,335
14	60	3	Sim	32200	0,196
15	60	5	Não	34200	0,209
16	60	5	Sim	35500	0,178
17	60	11	Não	37400	0,178
18	60	11	Sim	38700	0,178
19	120	3	Não	52000	0,178
20	120	3	Sim	53300	0,178
21	120	5	Não	55300	0,178
22	120	5	Sim	56600	0,178
23	120	11	Não	58500	0,178
24	120	11	Sim	59800	0,178

TABELA 5: Características do fluxo de ar para as opções

Opção da Proteção	Taxa de Primário ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Fluxo de Ar Secundário ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Uso de ventilador	Grau de Desconforto
0	10	2	não	nenhum
1	20	3	não	sem problemas
2	30	3	não	leve
3	30	3	sim	leve
4	60	3	sim	grave
5	60	5	sim	difícil de se trabalhar

TABELA 6: Doses individuais médias dos mineiros em cada grupo - caso base e opções

Opção da Proteção	Dose individual anual média (mSv)			Dose coletiva anual (Sv.pes)		
	I	II	III	I	II	III
0	55,2	41,8	33,1	0,221	0,167	0,298
1	40,8	34,5	28,9	0,163	0,138	0,260
2	28,4	22,6	17,1	0,114	0,089	0,154
3	26,0	21,0	16,3	0,104	0,084	0,147
4	17,5	12,6	8,4	0,070	0,050	0,076
5	15,8	11,3	7,8	0,063	0,045	0,070

TABELA 7: Custos anuais e doses coletivas anuais associadas para cada opção

Opção da Proteção	Custo anual da proteção, X US\$	Dose coletiva anual, S Sv.pes
0	0	0,686
1	10.400	0,561
2	17.200	0,357
3	18.500	0,335
4	32.200	0,196
5	35.500	0,178

TABELA 8: Resumo das tabelas 5, 6 e 7: dados considerados no exemplo da mina de Urânio

Opção da Proteção		1	2	3	4	5
Custo anual da proteção, US\$		10.400	17.200	18.500	32.200	35.500
Dose coletiva anual, Sv.pes		0,561	0,357	0,335	0,196	0,178
Doses médias anuais individuais para os trabalhadores em grupos, mSv	I	40,8	28,4	26,0	17,5	15,8
	II	34,5	22,6	21,0	12,6	11,3
	III	28,9	17,1	16,3	8,4	7,8
Desconforto da ventilação		sem problemas	leve	leve	grave	Difícil de se trabalhar

Nota: A dose coletiva é objeto de grandes incertezas por causa das dificuldades em estimar a dose efetiva a partir das medidas de Radônio. As diferenças e tendências são menos sujeitas a erros.

2.2.2. Análise custo-eficácia (Publicação 55 – CIPR)

Utilidade da técnica de ajuda para a tomada de decisão utilizada em proteção radiológica conhecida como custo-eficácia:

Poder eliminar as opções de proteção que não têm chance de se tornarem a solução analítica por apresentarem custos e/ou doses maiores do que as outras próximas.

Opções de proteção custo-efetivas

Entende-se por opções de proteção custo-efetivas aquelas opções de proteção que não foram eliminadas do processo de otimização pela técnica de análise custo-eficácia.

Razão custo-eficácia

É a razão entre o aumento do custo de ir de uma opção de proteção para a seguinte, ΔX , e a correspondente variação na dose coletiva ΔS . Portanto a razão custo-eficácia é representada por $\Delta X/\Delta S$.

Exemplo da pequena mina de urânio

No exemplo da pequena mina de urânio foram consideradas 24 opções além do caso base (opção zero = nenhuma proteção), de acordo com a TABELA 7 (vide item 2.2.1). A opção base foi eliminada pelo fato de que o grupo 1 excede os limites de dose (doses médias acima do limite anual). A figura 7 mostra a curva custo-eficácia e a TABELA 9 mostra as razões de custo-eficácia para as opções consideradas.

Figura 7 - Curva custo-eficácia com a linha unindo as 5 opções custo-efetivas

TABELA 9: Razões de custo-eficácia para as opções consideradas

Opção da Proteção	Custo de Proteção Anual X US\$		ΔX US\$	Dose coletiva anual S Sv.pes		ΔS Sv.pes	Razão Custo-eficácia $ \Delta X / \Delta S $ $US\$ (Sv.pes)^{-1}$
1	10.400	}		0,561	}		
			6.800			0,204	33.000
2	17.200			0,357			
			1.300			0,022	59.100
3	18.500			0,335			
		}	13.700		}	0,139	98.600
4	32.200			0,196			
			3.300			0,018	183.300
5	35.500			0,178			

Links Relacionados

- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

2.2.3. Análise custo-benefício integral (Publicação 55 – CIPR)

A análise custo-benefício integral originou-se na teoria econômica do bem estar em 1977 e 1978. As equações que representam a solução analítica são:

$$(X+Y)_{\text{mínimo}} \text{ ou } (X+\alpha S)_{\text{mínimo}}$$

Em que:

X representa o custo da opção de proteção que favorece a solução analítica

Y representa o custo do detrimento da opção de proteção de custo X

α representa o valor referência da dose coletiva unitária

S representa a dose coletiva da opção de custo X

Qualquer custo comum a todas as opções é sem importância para a escolha da opção ótima. Um fator pertinente poderia ser a fração que o custo de proteção representa no custo total da instalação.

Exemplo da pequena mina de urânio

O único critério especificado quantitativamente é o valor de α :

$$\alpha = \text{US\$ } 20,000.00 / \text{Sv-pessoa}$$

A figura 8 mostra a curva custo-benefício integral, enquanto a TABELA 10 traz a análise benefício integral para as opções consideradas.

Figura 8: Curva custo-benefício para as opções consideradas no exemplo da mina de urânio

TABELA 10: Análise custo-benefício integral para as opções consideradas

Opção da Proteção	Custo anual da proteção X US\$	Custo de detrimento anual Y US\$	Custo Anual Total (X+Y) US\$
1	10.400	11.200	<u>21.620</u>
2	17.200	7.140	24.340
3	18.500	6.700	25.200
4	32.200	3.920	36.120
5	35.500	3.560	39.060

Solução analítica:

Utilizando esta técnica de ajuda para tomada de decisão, a solução analítica é a OPÇÃO 1.

Análise dos fatores qualitativos:**1. Distribuição da dose individual:**

Observando-se a TABELA 8 (vide item 2.2.1) vê-se que na solução analítica da opção 1, há um grupo de trabalhadores (1) com doses muito próximas ao limite de dose, provavelmente próximas demais para um controle operacional fácil.

Na opção 2 teríamos uma boa redução da dose enquanto a opção 3 não apresenta ganho extra.

A opção 4 apresenta uma redução substancial da dose, o que não acontece na opção 5. Desta maneira a opção ótima se deslocaria para a opção 2 ou 4.

2. Desconforto provocado pela taxa de ventilação:

Pela análise qualitativa da TABELA 8 (vide item 2.2.1) vê-se que não existe nenhuma preocupação quanto às três primeiras opções. Existe uma indicação moderada contra a opção 4 e forte contra a opção 5.

A dificuldade de se combinar estas avaliações qualitativas com as soluções analíticas reside na importância relativa dada aos 4 fatores.

Neste exemplo, fazendo uso dos critérios “muito adverso” para a dose individual elevada e “muito conveniente” para o conforto, vemos que os 2 fatores vão em sentido contrário.

Uma vez que o fator “distribuição de dose” admite como ótimas as opções 2 e 4 e o fator “desconforto” descarta apenas as opções 4 e 5 vemos que , com um pequeno acréscimo de custo, a opção 3 poderia ser considerada a opção ótima, conforme a TABELA 8.

A análise de sensibilidade pode ser efetuada modificando-se o custo ou os valores das doses relacionados a uma ou várias opções para ver como a escolha pode ser afetada.

Links Relacionados

- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

2.2.4. Análise custo-benefício diferencial

Na técnica de tomada de decisão conhecida como análise custo-benefício diferencial só podem ser computados dois fatores, a saber: custo anualizado de proteção radiológica e dose coletiva laboral anual.

A equação matemática que representa a solução analítica é:

$$-\frac{X_i - X_{i-1}}{S_i - S_{i-1}} \leq \alpha$$

Em que:

X_i representa o custo de proteção da opção i

X_{i-1} representa o custo da opção de proteção anterior mais próxima da opção i

S_i representa a dose coletiva da opção de proteção i

S_{i-1} representa a dose coletiva da opção de proteção anterior mais próxima da opção i

α representa o valor referência da dose coletiva unitária

Caso raro

Esta análise pode apresentar mais de uma solução analítica quando a razão custo-eficácia não aumenta consistentemente, quando as opções são ordenadas a partir dos maiores valores de S_i para os menores valores.

O método diferencial pode não apresentar uma única solução e o método do custo-benefício integral deverá ser usado para se obter o verdadeiro mínimo.

Exemplo da pequena mina de urânio

Como todos os valores das razões de custo eficácia apresentados na TABELA 7 (vide item 2.1.1) são maiores do que o valor de referência α , a avaliação analítica é a opção 1 pois a opção 2 é por demais onerosa com relação ao valor referência:

US\$ 33.000 (Sv.pes)⁻¹ comparado com os US\$ 20.000 (Sv.pes)⁻¹

Isto poderá ser visualizado se reiserirmos no contexto a opção zero descartada. Neste caso, de acordo com a TABELA 7 (vide item 2.1.1), a razão custo-eficácia entre as opções 0 e 1 resultaria em:

$$\frac{\Delta X}{\Delta S} = \frac{10.400 - 0}{0,687 - 0,561} = \frac{10.400}{0,126} = 82.540$$

Portanto a opção 1 é a ótima por representar o ponto de mínimo.

Considerando os dois fatores qualitativos, chegaríamos ao mesmo resultado obtido com a análise custo-benefício integral. A solução analítica seria a opção 3.

Links Relacionados

- [Análise custo-benefício integral](#)
- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)
- [Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA](#)
- [Técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão](#)

2.2.5. Análise custo-benefício expandida (Publicação 55 – CIPR)

Procura ampliar o número de variáveis que podem ser quantificadas. A análise custo-benefício expandida introduz um ou dois fatores a mais modificando o valor básico de α que passa a ser acrescido de outros termos β definidos em cada intervalo em que é dividido o fator extra. Neste caso a equação do custo do detrimento, Y , passa a ser descrito como:

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

Os termos β_j definem os valores monetários do fator extra em cada intervalo em que foi subdividido e S_j representa as doses coletivas em cada intervalo do novo fator. Um fator pertinente em proteção radiológica é se as doses são grandes ou pequenas em relação aos limites, isto é, para um mesmo valor de dose coletiva é preferível irradiar um grande número de pessoas com doses pequenas de que um pequeno número de pessoas com doses grandes, especialmente aquelas que se aproximam do limite.

Exemplo da pequena mina de urânio

Critério adotado:

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

$$\beta_2 \rightarrow (5 \text{ mSv a } 15 \text{ mSv}) = \text{US\$ } 40.000,00 (\text{Sv-pessoa})^{-1}$$

$$\beta_3 \rightarrow (15 \text{ mSv a } 50 \text{ mSv}) = \text{US\$ } 80.000,00 (\text{Sv-pessoa})^{-1}$$

O custo de detrimento será:

$$Y = \alpha S + \beta_1 S_1 + \beta_2 S_2 + \beta_3 S_3$$

$$Y = 20000 S + 0 S_1 + 40.000 S_2 + 80.000 S_3$$

A distribuição das doses coletivas, neste formato, é calculada a partir dos dados da TABELA 6 (vide item 2.1.1) e mostrada na TABELA 11 juntamente com o custo do detrimento (Y) para cada opção. A TABELA 12 apresenta o custo total.

TABELA 11: Doses coletivas e custo do detrimento

Opção da Proteção	Dose Coletiva Anual Sv.pes				Custo de detrimento anual Y US\$
	S	S ₁	S ₂	S ₃	
1	0,561	0	0	0,561	56.100
2	0,357	0	0	0,357	35.700
3	0,335	0	0	0,335	33.500
4	0,196	0	0,126	0,070	14.560
5	0,178	0	0,115	0,063	13.200

TABELA 12: Custo total (X+Y)

Opção da Proteção	Custo anual da proteção US\$	Custo de detrimento anual US\$		Custo Anual Total US\$
		Termo α	Termo β	
1	10.400	11.200	44.900	66.000
2	17.200	7.100	28.600	53.000
3	18.500	6.700	26.800	52.000
4	32.200	3.900	10.700	47.000
5	35.500	3.600	9.600	49.000

A solução analítica é a opção 4.

Para se obter a solução ótima a partir da solução analítica deve-se considerar, qualitativamente, o fator desconforto associado à taxa de ventilação.

A introdução do fator de desconforto contraindica a opção 4 com substancial diferença a favor da opção 3. A decisão da recomendação ótima vai depender da importância dada ao fator de desconforto em relação aos outros 3 fatores quantificados. Se for considerado suficientemente importante, ele deslocará a solução ótima para a opção 3 com um aumento de custo relativamente grande.

Fazendo uso do critério “muito favorável”, para o fator desconforto, a opção 3 pode ser razoavelmente tomada como ótima.

Para investigar a sensibilidade da solução analítica podem ser feitas análises específicas dos valores dados aos β_j ou aos intervalos de dose j . Se os resultados forem razoavelmente insensíveis a estas variações, a informação é importante na avaliação da “robustez” da decisão.

Outros fatores que poderiam ser considerados pertinentes:

- distinguir a população irradiada, trabalhadores e público com critérios diferentes, tais como o valor da dose coletiva unitária, condenada tanto pela CIPR como pelo OIEA.
- diferenciar entre as irradiações rotineiras e anormais introduzindo o termo somado ao critério relativo ao custo da dose coletiva unitária, de acordo com a frequência e probabilidade de iniciar eventos que levem a tais irradiações. Pode-se incorporar julgamentos sobre o grau de aversão a eventos de probabilidade pequena e consequência grave.
- conhecer a distribuição temporal do detrimento, atribuindo um fator de ponderação menor à tomada de decisão para doses a serem recebidas no futuro e resultantes de atividades executadas no presente. Isto pode ser feito pela introdução de procedimentos de amortização ou pela seleção de um período truncado para o tempo de integração da taxa de dose coletiva. Doses além deste tempo seriam ignoradas.

A CIPR sugere a técnica de análise custo-benefício expandida com no máximo uma ou duas extensões. Em decisões que envolvam um maior número de fatores, a CIPR sugere o uso de outra técnica.

Links Relacionados

- [Análise custo-benefício expandida](#)
- [Análise custo-benefício integral](#)
- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

2.2.6. Análise de prioridades com atributos múltiplos (Publicação 55 – CIPR)

A análise de prioridades com atributos múltiplos evoluiu a partir de várias disciplinas incluindo a psicologia, a engenharia e a ciência gerencial. Começou a desenvolver-se em 1961 e completou-se em 1968.

A opção solução analítica pela análise de prioridades com atributos múltiplos é escolhida pelos pontos que ela conseguir angariar. A opção de proteção que tiver o maior número de pontos receberá a preferência ou a prioridade sobre os demais. Se duas opções empatarem não haverá preferência de uma sobre a outra.

Além de especificar os fatores e quantificar as opções deve-se incluir critérios para classificar a importância de cada fator em relação aos demais.

Como critério, introduz-se uma função de prioridade parcial u_j para cada fator j , a qual fornece a conveniência relativa do possível resultado para o fator j . A cada fator j é atribuída uma prioridade parcial $u_j=1$ ao melhor resultado ou consequência de menor adversidade (ex: custo menor, dose coletiva mínima etc) e uma prioridade parcial $u_j=0$ para a pior consequência. Os demais valores serão intermediados entre zero e um.

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

$$U_i = \sum_{j=1}^N k_j u_{j,i}$$

Onde

N é o número de fatores

$u_{j,i}$ é a função de prioridade parcial que representa a figura de mérito da opção i para o fator j

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

Geralmente as constantes de crescimento são normalizadas de modo que $\sum k_j = 1$. A solução analítica é dada pela opção de proteção com maior U .

Considerando a técnica de ajuda para a tomada de decisão denominada de análise de prioridades com atributos múltiplos, ainda que existam vários métodos para a geração das funções de prioridade parcial u_j , há um sugerido pela CIPR para a determinação de valores singulares $u_{j,i}$ válida quando o número de opções de proteção for maior do que dois:

Aquela desenvolvida por Keeney e Raffa entre 1976 e 1980. Ela consiste em atribuir uma prioridade parcial singular igual a zero para o pior valor X^0 , como por exemplo maior custo maior dose coletiva etc, e um valor singular de um para o melhor valor X^* , como por exemplo menor custo, menor dose coletiva. Os demais desempenhos terão valores entre zero e um.

Os valores entre zero e um não necessitam ser lineares, mas podem ser representados por qualquer curva que se queira como porções lineares em uma curva exponencial, curva logarítmica, curva potencial etc, mas a preferência é sempre a exponencial. Para esta última, necessita-se obter um terceiro ponto para individualizá-la.

Para determinar os valores singulares da função de prioridade parcial $u_{j,i}$, fazendo uso da curva exponencial, podem ser usadas as expressões matemáticas:

$a - be^{-cx}$ para a curva côncava crescente com $a>0$, $b>0$ e $c>0$ e para a curva côncava decrescente com $a>0$, $b>0$ e $c<0$.

$a + be^{cx}$ para a curva convexa crescente com $a>0$, $b>0$ e $c>0$ e para a curva convexa decrescente com $a>0$, $b>0$ e $c<0$.

Para caracterizá-la, é necessário o conhecimento de pelo menos um terceiro ponto. A posição relativa destes 3 pontos permite determinar a forma geral da função de prioridade com atributo singular como um aumento ou decréscimo da função côncava ou convexa.

As constantes a , b e c são calculadas a partir das coordenadas dos 3 pontos. Estas coordenadas podem ser obtidas pelo tomador de decisão que tem a possibilidade de conhecer, por exemplo, o ponto x tal que $u(x) = 1/2$.

Para se determinar os valores singulares da função de prioridade parcial $u_{j,i}$, no caso da curva exponencial, pode ser determinado o terceiro ponto, além das extremidades cujos valores são conhecidos:

Pelo conhecimento de um ponto X para o qual $u(X)=1/2$ e pela resposta a várias questões, como por exemplo:

- a. Basear a escolha nas extremidades e no ponto médio $(X^0+X^*)/2$
- b. Respondendo qual é a situação preferida entre as duas expostas a seguir:
 - Existe uma consequência $(X^0+X^*)/2$.
 - Existe uma probabilidade de 0,5 para a consequência X^0 e também para a consequência X^* .

Neste caso, são possíveis 3 respostas, a saber:

1. As duas situações são equivalentes, então, as prioridades associadas a elas também são equivalentes de modo que

$$u[(X^0+X^*)/2] = [u(X^0)+u(X^*)]/2$$

pois $X^0=X^*$, e a função de prioridades com atributo parcial singular é linear

$$u(X) = A+B+CX \text{ com}$$

- $A, B, C > 0$ para as funções crescentes
- $A, B > 0$ e $C < 0$ para as funções decrescentes

2. Se a primeira distribuição for preferida, teremos:

$$u[(X^0+X^*)/2] > [u(X^0)+u(X^*)]/2$$

A função de prioridade é côncava decrescente e corresponde à denominada “atitude de risco adverso”.

3. Se a segunda distribuição for preferida, teremos:

$$u[(X^0+X^*)/2] < [u(X^0)+u(X^*)]/2$$

A função de prioridade é convexa decrescente e corresponde à denominada “atitude de risco propenso”.

Curvas escolhidas para a determinação dos valores singulares das funções de prioridade parciais dos seguintes fatores: custo de proteção, dose coletiva e dose individual máxima:

- Custo de proteção: a forma da curva é linear.
- Dose coletiva: a forma da curva é linear.
- Dose individual máxima: a forma da curva é côncava decrescente.

As constantes de crescimento k_j na técnica de ajuda para a tomada de decisão podem ser determinadas:

- Pela avaliação direta
- Pela avaliação por razões de substituição

As constantes de crescimento k_j , na técnica de avaliação direta, constantes essas isoladas podem ser determinadas impondo que a importância de cada fator é proporcional ao seu intervalo de variação, isto é, $X^* - X^0$, para em seguida serem normalizadas. O problema desta técnica é que ela é muito parcial, uma vez que se um fator tiver um intervalo entre o seu melhor valor e o pior muito grande com relação aos demais fatores, ele predominará sobre os outros. As constantes de crescimento, k_j , pela técnica de avaliação por razões de substituição podem ser determinadas dispondo a importância de cada fator em ordem decrescente de acordo com a conveniência do tomador de decisão e a seguir ele estabelece a importância relativa de cada fator percentualmente com relação ao fator mais importante. Por fim esses valores são normalizados.

Exemplo da pequena mina de urânio

Os 4 fatores na análise:

- custo de proteção
- dose coletiva
- distribuição de doses individuais
- desconforto provocado pelas grandes taxas de ventilação

1. Reproduzir as soluções analíticas obtidas por meio das análises custo-benefício integral e expandida, seguindo os mesmos passos.

2. Obter a solução analítica introduzindo o fator desconforto, de maneira quantitativa, usando todos os fatores pertinentes.

Esta técnica aceita também fatores não lineares e para tanto será usada a dose individual máxima próxima ao limite de dose. Isto tem alguns aspectos em comum com a atribuição do custo por unidade de dose coletiva como função do valor da dose mas não tem, exatamente, o mesmo valor e nem é governado pelo mesmo critério: $\alpha = F(D)$.

Pontos importantes a considerar:

- As formas atribuídas às funções de prioridade parciais

- A derivação das funções de crescimento

Análise custo-benefício integral

Na análise custo-benefício simples está implícita a hipótese de que no intervalo de variação dos custos, qualquer mudança de um custo independe de sua posição dentro do intervalo (início, meio ou fim). Portanto, a variação do custo é linear assim como serão também lineares as funções de prioridade parciais, conforme apontado na figura 9.

Figura 9: Função de prioridade parcial para o custo no exemplo da mina de urânio

Se já houver sido recomendado um valor referencial (critério) para a dose coletiva unitária (ex: $\alpha = \text{us\$ } 20,000.00$), as constantes de crescimento devem atender a este valor.

Podemos usar a técnica de avaliação direta para determinar as constantes de crescimento de modo que a constante de crescimento para o custo de proteção, $k(X)$, está para o intervalo de custo de proteção, $R(X)$, assim como a constante de crescimento da dose coletiva, $k(S)$, está para o intervalo de custo de detrimento, $\alpha R(S)$, onde $R(S)$ é o intervalo de doses coletivas.

$$\left. \begin{aligned} k(X) / R(X) &= K(S) / \alpha R(S) \\ k(X) + k(S) &= 1 \end{aligned} \right\} (1)$$

De acordo com a TABELA 8 (vide item 2.1.1) temos:

- $R(X) = \text{US\$ } 35,500 - \text{US\$ } 10,400 = \text{US\$ } 25.100$
- $R(S) = 0.561 - 0.178 = 0.383 \text{ Sv-pessoa}$

Substituindo em (1):

- $k(X) = 0.77$
- $k(S) = 0.23$

Com esses valores monta-se a TABELA 13 e a solução analítica está sublinhada.

TABELA 13: Prioridades parciais e totais com crescimento para cada opção

Opção da Proteção	Custo Anual da Proteção X US\$	Dose Coletiva Anual S Sv.pes	Prioridades Parciais		Prioridades Parciais com Crescimento		Prioridades Totais U_j
			$u(X)$	$u(S)$	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	
1	10.400	0,561	1	0	0,77	0	<u>0,77</u>
2	17.200	0,357	0,729	0,533	0,56	0,12	0,68
3	18.500	0,335	0,677	0,590	0,52	0,14	0,66
4	32.200	0,196	0,131	0,953	0,10	0,22	0,32
5	35.500	0,178	0	1	0	0,23	0,23

Análise custo-benefício expandida

Deve-se considerar as funções de prioridade sugeridas no tratamento da dose coletiva usando os termos β . Estas funções são supralineares mas foram consideradas como três funções lineares distintas nas 3 regiões de dose individual em que foram definidas.

A análise de prioridade com atributos múltiplos é conduzida no mesmo formato, ainda que isto acarrete uma montagem para cada faixa de dose coletiva, como um fator separado, com uma prioridade parcial linear.

Para se obter as constantes de crescimento, os valores de $R(S_n)$ para as 3 regiões de dose coletiva e o intervalo $R(S)$ correspondente ao termo β , foram tirados da TABELA 5.

$$R(S) = 0,561 - 0,178 = 0,383$$

$$R(S_1) = 0$$

$$R(S_2) = (4 \times 12,6 + 9 \times 8,4) \times 10^{-3} - 0 = 0,126$$

$$R(S_3) = 0,561 - (4 \times 15,8) \times 10^{-3} = 0,498$$

As equações que definem as constantes de crescimento são:

$$\frac{k(X)}{R(X)} = \frac{k(S_n)}{\beta_n R(S_n)} \quad (2)$$

$$k(X) + k(S) + \sum_{n=1}^3 k(S_n) = 1 \quad (3)$$

Rearranjando os termos de (2) temos:

$$k(S_n) = \beta_n R(S_n) k(X) / R(X)$$

Fazendo as substituições:

$$k(S) = 20.000 \times 0,383 k(X) / 25.100 = 0,305 k(X)$$

$$k(S_1) = 0 \times k(X) / 25.100 = 0 \times k(X)$$

$$k(S_2) = 40.000 \times 0,126 k(X) / 25.100 = 0,201 k(X)$$

$$k(S_3) = 80.000 \times 0,498 k(X) / 25.100 = 1,587 k(X)$$

$$k(X) + k(S) + k(S_1) + k(S_2) + k(S_3) = 1$$

$$k(X) + 0,305 k(X) + 0,201 k(X) + 1,587 k(X) = 1$$

$$3,093 k(X) = 1 \rightarrow k(X) = 0,323$$

$$k(S) = 0,305 \times 0,323 = 0,099$$

$$k(S_2) = 0,201 \times 0,323 = 0,065$$

$$k(S_3) = 1,587 \times 0,323 = 0,513$$

A TABELA 14 mostra a análise de prioridades parciais e prioridades totais que correspondem à análise custo-benefício expandida para as opções consideradas. A solução analítica aparece sublinhada.

TABELA 14: Análise de prioridades parciais e totais - análise custo-benefício expandida

Opção da Proteção	Prioridades Parciais				Prioridades Parciais com Crescimento				Prioridades Totais U_i
	$u(X)$	$u(S)$	$u(S_2)$	$u(S_3)$	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	$k(S_2)u(S_2)$	$k(S_3)u(S_3)$	
1	1	0	1	0	0,323	0	0,065	0	0,388
2	0,729	0,533	1	0,410	0,235	0,053	0,065	0,210	0,563
3	0,677	0,590	1	0,454	0,219	0,058	0,065	0,233	0,575
4	0,131	0,953	0	0,986	0,042	0,094	0	0,506	<u>0,642</u>
5	0	1	0,087	1	0	0,098	0,006	0,514	0,618

Análise de prioridade com atributos múltiplos em seu próprio contexto

Uma maneira de alcançar este objetivo seria atribuir uma função não linear ao fator “dose individual máxima” e manter as funções parciais lineares para o custo de proteção anual, para a dose coletiva anual e para a ventilação.

Exemplo da mina

Na aplicação desta técnica ao exemplo da mina de urânio, é importante notar que:

1. Os valores da importância relativa dos elementos de crescimento são atribuídos diretamente, ainda que sejam semelhantes àqueles atribuídos via análise custo benefício. São eles:

$$k(x) = k(s) = k(d) = 2/7 \text{ e } k(v) = 1/7$$

2. As prioridades resultantes deste modelo são as mesmas que as do modelo anterior, para os fatores que foram tratados do mesmo modo: custo de proteção, dose coletiva e desconforto.

3. Um novo conjunto de prioridades para a dose individual máxima substitui os três conjuntos formados pelos termos β .

A dose individual máxima caracteriza a distribuição de dose e a sua função de prioridade parcial corresponde a um risco de atitude adversa.

Usando a dose individual máxima como um fator que caracteriza a distribuição de dose, a equação que a representa é uma função de risco adverso decrescente descrita por:

$$u(x) = a - b e^{-cx} \quad (a > 0; b > 0; c < 0)$$

Definida pelos pontos (x, u(x)): (15,8; 1), (40,8; 0) e (25,0; 0,8). Os dois primeiros pontos foram tomados da TABELA 8 (vide item 2.1.1) e o terceiro foi escolhido pelo tomador de decisão.

Determinando-se os valores de a, b, c obtemos:

$$u(d_i) = 1,243 - 0,243 \exp[0,065(d_i - 15,8)]$$

A TABELA 15 traz as prioridades parciais para cada fator para as opções consideradas usando a análise alternativa de propriedades com atributos múltiplos.

TABELA 15: Prioridades parciais - análise de prioridades com atributos múltiplos

Opção da Proteção	Custo Anual Prot. X US\$	Dose Col. Anual S Sv.pes	Dose Ind. Anual Máx. d mSv	Desconforto da Ventilação V	Prioridades Parciais			
					u(X)	u(S)	u(d)	u(V)
1	10.400	0,561	40,8	Sem problemas	1	0	0	1
2	17.200	0,357	28,4	Leves	0,729	0,533	0,690	0,75
3	18.500	0,335	26,0	Leves	0,677	0,590	0,770	0,75
4	32.200	0,196	17,5	Graves	0,131	0,953	0,971	0,25
5	35.500	0,178	15,8	Difícil de se trabalhar	0	1	1	0

Com os valores atribuídos às constantes de crescimento dadas no item 1, monta-se a tabela 16, do exemplo da mina, na qual encontramos a solução analítica que encontra-se sublinhada.

TABELA 16: Análise de prioridades com atributos múltiplos em seu próprio contexto

Opção da Proteção	Prioridades parciais com crescimento				Prioridades Totais U_i
	k(X)u(X)	k(S)u(S)	k(d)u(d)	k(V)u(V)	
1	0,286	0	0	0,143	0,429
2	0,208	0,152	0,197	0,107	0,664
3	0,193	0,169	0,220	0,107	<u>0,689</u>
4	0,037	0,272	0,277	0,036	0,622
5	0	0,286	0,286	0	0,572

Mesmo com os elementos de crescimento completamente diferentes e com o uso de um conjunto diferente de fatores, o resultado da solução analítica não é afetado. A opção 3 continua sendo apontada como ótima, mostrando que o resultado global de uma análise depende dos dados de entrada e dos critérios especificados e não dos detalhes da técnica analítica.

Links Relacionados

- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

2.2.7. Análise de critérios múltiplos excedentes (Publicação 55 – CIPR)

Há grande diferença entre a técnica de análise com critérios múltiplos excedentes e as demais técnicas de ajuda para a tomada de decisão:

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

Pelas técnicas de tomada de decisão usadas no processo de otimização da proteção radiológica conhecidas como agregativas devem ser satisfeitas duas condições:

- Todos os fatores devem ser necessários
- O desempenho pobre de um fator é compensado pelo melhor desempenho de outros fatores.

As técnicas agregativas apresentam dificuldades quando os fatores são muito heterogêneos ou quando só podem ser avaliados de maneira qualitativa.

Exemplos de dificuldades:

- Aceitação pública ou impacto sobre as relações da equipe
- Quando as opções de proteção são completamente opostas, como uma comparação entre o custo de proteção mínimo e o detrimento máximo com o custo máximo e o detrimento mínimo quando as somas forem iguais.

A técnica de análise com critérios múltiplos excedentes leva vantagens sobre as técnicas agregativas no processo de otimização da proteção radiológica quando os fatores das opções de proteção forem muito heterogêneos, isto é, eles não podem ser ordenados de forma crescente ou decrescente com relação às opções ou quando só podem ser avaliados de maneira qualitativa.

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

- Indicador de vantagem – que expressa o quanto a opção i é preferível à opção m

- Critério de exclusão – que expressa em que grau as desvantagens da opção i, em relação à opção m, são significativas, para os fatores em relação aos quais i é preferível a m.

O indicador de vantagem $Ad_{i,m}$ usado na técnica de análise de critérios múltiplos excedentes é determinado fazendo:

$Ad_{i,m} = 1$ quando i for preferível ou equivalente a m para todos os fatores j

$Ad_{i,m} = 0$ quando i não for preferível a m para todos os fatores j

$0 < Ad_{i,m} < 1$ quando i for preferível ou equivalente a m para alguns dos fatores j

Neste último cálculo pode-se incorporar critérios de vantagem fazendo uso de constantes de crescimento k_j . Neste caso:

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

Onde

a_j é o indicador de vantagem para o fator j.

$a_j = 1$ se a opção i for melhor do que a opção m para o fator j, caso contrário $a_j = 0$

O critério de exclusão $Ec_{i,m}$, usado na técnica de análise de critérios múltiplos excedentes é determinado fazendo:

$Ec_{i,m} = 1$ quando os prejuízos associados à escolha da opção i, em vez de m, são muito grandes. Do outro modo $Ec_{i,m} = 0$.

Limiar de exclusão utilizado na técnica de análise de critérios múltiplos excedentes para a tomada de decisão

O limiar de exclusão representa o valor em que o prejuízo, isto é, a desvantagem de cada fator da opção i é considerada muito grande com relação àquele da opção m.

Exemplo da pequena mina de urânio

Foram usados os mesmos quatro fatores da análise alternativa de prioridades com atributos múltiplos, a saber:

- Custo de proteção (X)
- Dose coletiva (S)
- Dose individual máxima (d)
- Desconforto causado pela ventilação (V)

Com os valores das cinco primeiras colunas da tabela de propriedades parciais para cada fator usando a análise alternativa de propriedades com atributos múltiplos.

TABELA 17: Fatores da análise de prioridades com atributos múltiplos

Opção da Proteção	Custo Anual Prot. X US\$	Dose Col. Anual S Sv.pes	Dose Ind. Anual Máx. d mSv	Desconforto da Ventilação V	Prioridades Parciais			
					u(X)	u(S)	u(d)	u(V)
1	10.400	0,561	40,8	Sem problemas	1	0	0	1
2	17.200	0,357	28,4	Leves	0,729	0,533	0,690	0,75
3	18.500	0,335	26,0	Leves	0,677	0,590	0,770	0,75
4	32.200	0,196	17,5	Graves	0,131	0,953	0,971	0,25
5	35.500	0,178	15,8	Difícil de se trabalhar	0	1	1	0

Foram também usados os mesmos critérios para os quatro fatores, a saber:

$$k(X) = k(S) = k(d) = 2/7 \quad k(V) = 1/7$$

Conforme a tabela 17, a opção 1 é mais vantajosa do que a opção 2 para o custo de proteção e para o desconforto da ventilação. Para os demais fatores a opção 2 leva vantagem.

$$\text{Desta maneira: } ad_{1,2} = 2/7 + 1/7 = 3/7 = 0,43$$

($Ad_{1,2}$ = indicador de vantagem da opção 1 sobre a opção 2)

A TABELA 18 mostra os indicadores de vantagem para cada opção considerada, comparada com as demais.

TABELA 18: Análise de prioridades com atributos múltiplos - indicadores de vantagem

m	1	2	3	4	5
i	$Ad_{i,m}$				
1	-	0,43	0,43	0,43	0,43
2	0,57	-	0,43	0,43	0,43
3	0,57	0,71	-	0,43	0,43
4	0,57	0,57	0,57	-	0,43
5	0,57	0,57	0,57	0,57	-

As opções de número mais elevado tem vantagens maiores do que aquelas de número menor.

- O primeiro critério de exclusão é o limite de dose, que elimina a opção zero.
- O segundo critério de exclusão poderia ser relacionado ao fator desconforto provocado pela ventilação.

Se o tomador de decisão quiser discriminar enfaticamente contra as opções que fornecem desconforto grave ele poderia estabelecer um limiar de exclusão entre 0,25 e 0,50, por exemplo 0,40.

Neste caso, a diferença entre as opções 2 e 1, para o desconforto é $1 - 0,75 = 0,25$, menor do que 0,40 e portanto $Ec_{2,1} = Ec_{1,2} = 0$. Repetindo-se esta operação para todas as opções monta-se a tabela 19 de critérios de exclusão para as opções consideradas, comparadas cada uma com as demais, para o desconforto causado pela ventilação.

TABELA 19: Critério de exclusão - fator desconforto provocado pela ventilação

m	1	2	3	4	5
j	$Ec_{i,m}$				
1	-	0	0	1	1
2	0	-	0	1	1
3	0	0	-	1	1
4	1	1	1	-	0
5	1	1	1	0	-

Por essa tabela vê-se que o critério de exclusão para ventilação é igual a zero para todas as combinações entre as opções 1, 2 e 3 e para a combinação entre as opções 4 e 5. O limiar de exclusão é igual a 1 para qualquer comparação entre os dois grupos.

Partindo destes dois conjuntos de resultados, são montadas as relações excedentes. Neste exemplo, a opção i excede a opção m se:

$$Ad_{i,m} > 0,5 \quad Ec_{i,m} = 0$$

A análise das tabelas leva aos seguintes resultados:

- A opção 2 excede a opção 1
- A opção 3 excede a opção 1
- A opção 3 excede a opção 2
- A opção 5 excede a opção 4

As opções 3 e 5 excedem as demais, mas não se excedem entre si. Esta análise não forneceu uma solução única, mas a aplicação de um critério de eliminação mais discriminatório poderia fazê-lo.

Se o critério de eliminação fosse elevado a 0,6 (em lugar de 0,5) a única relação remanescente seria aquela da opção 3 que excede a opção 2 e portanto a solução analítica seria a opção 3. Esta seria também a solução ótima desde que todos os fatores foram incluídos na análise.

Observação:

O resultado final, com um limiar de exclusão mais restritivo (0,6), é o mesmo que o obtido usando a técnica de prioridade com atributos múltiplos. Entretanto isto nem sempre ocorre pois a técnica dos critérios múltiplos excedentes introduz critérios preferenciais de uma forma diferente das técnicas agregativas.

Análise de sensibilidade:

A análise de sensibilidade pode ser efetuada do mesmo modo que para as demais técnicas. A escolha dos limiares de exclusão pode ser um aspecto importante que pode revelar as consequências do julgamento. Uma vez que tenha sido desenvolvida uma experiência no uso da técnica, os indicadores de vantagem parciais ou completos e os critérios de exclusão que podem ser adotados, podem levar a cabo uma grande parte da análise de sensibilidade.

Links Relacionados

- [Análise de critérios múltiplos excedentes](#)
- [Exemplo da pequena mina de urânio](#)

2.2.8. Escolha da técnica de ajuda para tomada de decisão (Publicação 55 – CIPR)

Escolha da técnica

A CIPR, deliberadamente, absteve-se de recomendar uma técnica particular. Foi dada ênfase no sentido de mostrar que os aspectos importantes da análise são:

- análise inicial do problema para gerar um conjunto de opções;
- identificar e quantificar os fatores pertinentes;
- adotar julgamentos explícitos em relação aos critérios para comparar o desempenho e o custo das opções e tornar o processo de análise mais transparente para inspeção.

A CIPR espera que a maior parte das situações não exijam uma técnica mais complexa do que a análise de custo-benefício integral ou expandida. Contudo, recomenda a consideração das técnicas mais aceitáveis para cada caso, especialmente a análise de prioridades com atributos múltiplos, pelo discernimento no tratamento dos fatores difíceis de serem quantificados e pelo desenvolvimento da compreensão que ela pode estimular.

2.3. Outras Considerações Sobre Esforços de Proteção

2.3.1. Custos dos esforços de proteção (Publicação 55 – CIPR)

Os custos de um processo de otimização da proteção radiológica devem ser atribuídos a instâncias superiores aos envolvidos no processo de otimização e devem fazer parte de exigências regulamentares ou gerenciais. Não devem ser repassados para as opções de proteção radiológica.

O processo de otimização da proteção radiológica é dispensado quando:

- o custo do estudo quantitativo da otimização é maior do que o benefício a ser obtido. Neste caso o procedimento ótimo é não efetuar o estudo, isto é, não alterar o grau de proteção;
- as doses individuais dos trabalhadores encontram-se na região aceitável, isto é, inferiores ao limiar de registro das doses.

Os métodos usados para avaliar os custos diretos das opções de proteção no processo de otimização da proteção radiológica são:

- Estimativa grosseira dos custos
- Avaliação trazendo o valor presente
- Estimativas anualizadas de custo

Estimativa grosseira dos custos

A estimativa grosseira dos custos usada no processo de otimização da proteção radiológica é realizada somando o custo do capital com o custo da operação anual durante os anos previstos de vigência.

Principais desvantagens do método de estimativa grosseira dos custos usada no processo de otimização da proteção radiológica:

- Ignora variações de custo no tempo
- Não permite distinção entre as opções com grande custo de capital e pequeno custo operacional e vice-versa.

Avaliação trazendo o valor presente

A avaliação trazendo o valor presente usado no processo de otimização de proteção radiológica é realizada por meio do preço atual, que é fornecida pelo custo anual multiplicado pelo fator anuidade.

O fator anuidade é a soma dos fatores da amortização sobre os períodos de tempo pertinentes e esses fatores de amortização consideram a mudança do valor aparente do gasto com o transcorrer do tempo.

Estimativas anualizadas de custo

A estimativa anualizada de custo usada no processo de otimização de proteção radiológica é realizada supondo que o dinheiro seja tomado emprestado, a uma determinada taxa anual, para financiar a compra e a operação do sistema de proteção radiológica e seja devolvidos em parcelas anuais.

Links Relacionados

- Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA

2.3.2. Distribuição da dose no tempo (Publicação 55 – CIPR)

Distribuição da dose individual

Quando a distribuição das doses individuais ou as doses máximas ou médias individuais for considerada como um atributo (fator) no processo de otimização da proteção radiológica, ela pode ser expressada em diferentes intervalos de doses individuais ou como uma porcentagem com relação ao limite anual pertinente.

Distribuição da dose no tempo

Em alguns casos podemos truncar a distribuição de doses em função do tempo transcorrido considerado como atributo (fator) no processo de otimização da proteção radiológica:

- Quando a distribuição de doses após um determinado tempo for comum a todas as alternativas ou quando não for mais possível distinguir as diferentes opções de proteção.
- Quando a taxa de dose coletiva, que pode ser usada como um discriminador entre as opções de proteção, apresentar grandes incertezas dificultando a distribuição entre as opções de proteção.
- Quando a distribuição no tempo da taxa de dose coletiva apresentada como uma das componentes que leva à decisão, mostrar que existem razões associadas com a percepção da importância social das doses em diferentes períodos de tempo. Essas razões vão impor ao tomador de decisão, dar diferentes elementos de ponderação a elas, em sua decisão.

Probabilidade de que as doses sejam recebidas

Para expressar o risco da exposição potencial para ser usada no processo da otimização da proteção radiológica, a CIPR sugere a seguinte equação matemática:

$$dR = P(D) dD P(EFF/D)$$

onde

R representa o risco à saúde

$P(D)$ é a densidade de probabilidade da ocorrência

$P(D) dD$ é a probabilidade de início do evento que dá origem a uma dose entre D e $D+dD$

$P(EFF/D)$ é a probabilidade de ocorrer um efeito grave, resultante da dose D , no indivíduo ou descendente.

Entre a probabilidade de ocorrer um efeito grave à saúde, na exposição potencial, e a dose recebida pelo indivíduo, a CIPR sugere as seguintes relações:

- Uma relação proporcional (linear) na região estocástica até cerca de 1Sv.
- Uma relação não proporcional para o intervalo em que podem ocorrer efeitos determinísticos, isto é, de 1-2 Sv até 5-10 Sv.
- Probabilidade constante no intervalo de dose letal.

Alguns problemas que podem surgir no processo de otimização para situações de exposição potencial:

1. Na região determinística deve-se conhecer a distribuição de doses em detalhes para se poder avaliar o risco.
2. Quando se puder atribuir probabilidades de ocorrência da situação potencial e calcular os seus impactos, deve-se considerar tanto a sua probabilidade como a sua consequência.
3. O detrimento que corresponde a uma dose coletiva não é um dado suficiente para o processo de otimização, principalmente quando a probabilidade é pequena e a consequência é grande.
4. Deve-se dar importâncias diferentes aos valores esperados quando o intervalo de variação está próximo ao valor médio e quando o intervalo é muito grande com relação ao valor médio.
5. A apresentação das consequências torna-se complicada, uma vez que pode ter muitos pontos finais, incluindo efeitos agudos à saúde e interrupções, como aquela causada por evacuações das áreas.

Links Relacionados

- [Efeitos biológicos da radiação](#)
- [Exigência básica do sistema de proteção radiológica](#)
- [O valor alfa decresce com o acréscimo da dose efetiva anual individual? Percepção teórica](#)
- [Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA](#)

2.3.3. Outros fatores de proteção radiológica pertinentes para o processo de otimização (Publicação 55 – CIPR)

Além do custo de proteção, dose coletiva e distribuição das doses individuais outros fatores poderiam ser considerados nas opções de proteção radiológica:

- Taxa de dose no local de trabalho
- Confiabilidade das diferentes opções
- Natureza da população exposta

Taxa de dose no local de trabalho

No caso de se usar a taxa de dose no local de trabalho como fator que entra no processo da otimização, poderiam ser fornecidos alguns exemplos que justificariam o seu uso:

- Locais de grande taxa de dose que necessitam de dosimetria rápida e portanto do uso de monitores de leitura direta da taxa de dose ou de monitores integradores.
- Possibilidade de exposições originadas de pequenos acidentes e incidentes, como a permanência em um local de grande taxa de dose por um tempo superior ao previsto.

Confiabilidade das diferentes opções

A confiabilidade das diferentes opções de proteção poderiam estar baseadas em procedimentos de engenharia bem conhecidos ou relativamente novos, ainda que os custos e as doses sejam semelhantes. Poderiam ser utilizadas as palavras “bastante confiável ou bem ensaiada” em contraste com “confiabilidade duvidosa ou nova” respectivamente. Nesses casos, a CIPR sugere que seja usada a análise de prioridades com atributos múltiplos.

Natureza da população exposta

No caso de se usar a natureza da população exposta como um fator que entra num processo de otimização, alguns exemplos de como ele poderia variar:

- Distinção entre trabalhadores e indivíduos do público, e mesmo entre estas categorias pode haver subdivisões.
- O grupo irradiado é constituído por pessoas do país que causa ou regula a irradiação ou de pessoas de outros países.

Links Relacionados

- [Outras considerações e recomendações internacionais sugeridas pelo OIEA](#)

2.3.4. Aplicação do procedimento de otimização da proteção radiológica (Publicação 55 – CIPR)

Como é aplicado o procedimento de otimização da proteção radiológica

O procedimento de otimização da proteção radiológica em instalações já existentes deve ser prioritário para as operações efetuadas nelas porque identificaria os aspectos de projeto, operação, manutenção e inspeção em serviço, que podem ser considerados prioritários, para modificação, no sentido de se trabalhar em direção ao ótimo.

Efetuar o processo de otimização da proteção radiológica em instalações grandes cabe ao operador, vendedor ou licenciado pois tenderia a ser específica para uma instalação ou um problema em mãos.

Efetuar o processo de otimização da proteção radiológica em instalações pequenas cabe à autoridade competente de cada país ou a quem ela delegar o estudo, pois os especialistas e os recursos disponíveis do operador podem não ser suficientes. Neste caso o resultado levará a procedimentos padronizados que imporão as modificações necessárias.

Aplicação do procedimento de otimização da proteção radiológica ao projeto de uma instalação

As tomadas de decisão no âmbito de projeto de uma instalação, para o processo de otimização da proteção radiológica, são as mais importantes porque durante a elaboração do projeto de uma instalação são fixados os principais aspectos que determinam o grau de proteção exigido. Serão determinados valores como as taxas de dose nos diferentes ambientes da instalação e valores de descontaminação.

Os engenheiros de um projeto que envolve radiação ionizante visando o processo de otimização da proteção radiológica devem possuir qualificação e treinamento apropriado, incluindo conceitos básicos de proteção radiológica. Devem estar familiarizados com as técnicas que ajudam na tomada de decisão e com os parâmetros de projeto que podem afetar o grau de proteção.

O líder de equipe do projeto ou da equipe de planejamento de uma instalação que envolva a radiação ionizante tem um papel crucial na implementação da otimização da sua proteção radiológica porque é a pessoa que decide a respeito do esforço extra a ser aplicado na proteção radiológica para otimizar o projeto em vez de, simplesmente, obedecer os limites regulamentares.

Aplicação do procedimento de otimização da proteção radiológica às operações

Nos procedimentos de otimização da proteção radiológica aplicada a operações, o intervalo de escolhas é limitado pelo projeto e pelos fatores que podem ser difíceis de serem quantificados. Este intervalo de escolhas depende do comprometimento e especialização do pessoal responsável, em todos os graus, especialmente dos trabalhadores, seus supervisores locais imediatos, dos especialistas em proteção radiológica e da direção.

Para o processo de otimização da proteção radiológica a CIPR reconhece que avaliações simples de segurança podem reduzir taxas de dose elevadas em locais de trabalho, mas julga necessário a educação e o treinamento de toda a equipe operacional envolvida no trabalho com radiação ionizante e que o treinamento deva incluir a proteção radiológica e componentes capazes de gerar atitudes positivas para a otimização.

Segundo a CIPR, o papel do especialista em proteção radiológica é primordial e único no processo de otimização da proteção radiológica, porque ele está envolvido em todas as áreas de trabalho e pode assegurar o planejamento sistemático do trabalho nas áreas de radiação, particularmente quando as taxas de dose são grandes. Também pode correlacionar as doses do trabalhador a determinadas tarefas e redigir relatórios de revisão e de avaliação das falhas da instalação, do treinamento etc.

Nos procedimentos de otimização da proteção radiológica, há papéis desempenhados diferentemente pelo especialista em proteção radiológica e pela gerência da instalação: enquanto o especialista em proteção radiológica está principalmente interessado em obter uma melhor proteção, o gerente defronta-se com um conflito de interesses entre as responsabilidades de otimizar a proteção radiológica, de alocar recursos e de assegurar a operação contínua.

Links Relacionados

- [Educação geral do trabalhador](#)
- [Estádio do projeto](#)
- [Treinamento especializado](#)

2.3.5. Responsabilidades gerais das autoridades competentes (Publicação 55 - CIPR)

Nos procedimentos de otimização da proteção radiológica, o que compete ser especificado pela autoridade competente do país e em que circunstâncias ele deve ser obedecido?

A autoridade competente do país deveria especificar os critérios gerais necessários à implementação dos procedimentos de otimização e estes devem ser obedecidos em todas as circunstâncias, variando desde os maiores projetos até o controle das doses individuais no local de trabalho.

Algumas maneiras da autoridade competente do país poder ajudar e fazer-se presente no processo de otimização da proteção radiológica:

1. Encorajando o desenvolvimento de técnicas de ajuda, nas decisões próprias para as avaliações de otimização e recomendando o seu uso.
2. Estabelecendo critérios básicos importantes, tais como o valor unitário da dose coletiva, para realizar as avaliações de otimização.
3. Recomendando os fatores pertinentes a serem considerados nos diferentes tipos de estudos de otimização.
4. Orientando os planejadores e gerentes na aplicação dos requisitos, caso a caso.

5. Encorajando a busca de informação apropriada para determinar os parâmetros e modelos de proteção radiológica pertinentes ao estudo da otimização.
6. Fazendo ou delegando avaliações genéricas de modo a estabelecer parâmetros de projeto otimizados e recomendando padrões que possam ser considerados otimizados.
7. Assegurando a compreensão e qualidade da implementação da otimização da proteção radiológica no projeto, na operação e na manutenção por meio de regulamentos legais apropriados e auditorias no desempenho das atividades.

Links Relacionados

- [Responsabilidade da decisão final](#)

3. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

3.1. Processo de Otimização da Proteção Radiológica

3.1.1. Exigência básica do sistema de proteção radiológica (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

A CIPR recomenda otimizar o patamar da proteção em nível inferior às restrições de dose relativas à fonte, independentemente da situação de exposição, isto é, normal, de emergência ou existente (otimização em nível inferior às restrições de dose).

De acordo com a publicação 21 do OIEA, as restrições de dose foram introduzidas para fornecerem uma fronteira à otimização em um estudo especificado com doses individuais bem inferiores aos limites anuais. Elas são relativas à fonte no intervalo das opções consideradas na otimização da fonte em apreço, portanto, devem ser estabelecidas com base em caso por caso para estarem consistentes com as características específicas da situação de exposição e elas devem ser estabelecidas, preferencialmente, pela gerência, consultando os trabalhadores envolvidos.

3.1.2. Considerações sobre o processo de otimização (Publicação 101 – CIPR; Publicação 37 – CIPR; Publicação 55 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, o processo de otimização difere atualmente das publicações 37 e 55 da CIPR.

É um processo mais extenso daquele anteriormente preconizado, que reflete o papel aumentado da equidade individual, da cultura de segurança e do envolvimento dos interessados em nossas sociedades modernas.

A publicação nº 101 da CIPR abrange a situação normal, de emergência e existente, onde as exposições radiológicas são susceptíveis de controle, mas não abrange a exposição de pacientes.

No processo de otimização, a publicação 101 da CIPR confere mais atenção aos seguintes assuntos:

- Ao tratamento da distribuição da dose individual;
- Às responsabilidades da gerência operacional e das autoridades competentes;
- Às oportunidades no envolvimento dos interessados durante a implementação do princípio de otimização.

Esta publicação procura tornar claros os seguintes papéis no processo de otimização da proteção radiológica:

- Da estrutura da decisão
- Da ajuda na decisão
- Na própria tomada de decisão

- Na colocação em prática do processo de otimização

Links Relacionados

- Dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização
- Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR
- Surgimento dos princípios básicos da radioproteção

3.1.3. Otimização da proteção radiológica (Publicação 101 – CIPR; Serie de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

O que se pretende com a otimização da proteção radiológica:

De acordo com a publicação 21 do OIEA, pretende-se diminuir as doses dos trabalhadores que já se encontram abaixo dos limites, pois elas não são suficientes para se alcançar um grau de proteção aceitável. Eles representam a fronteira inferior de uma região de doses e riscos considerados inaceitáveis. Portanto, doses logo abaixo dos limites só podem ser toleradas se não pode ser, racionalmente, feito nada, para reduzi-las. Contudo, quando pode ser feito algo, o que ocorre na maioria das situações, entra-se no regime da otimização.

Como a publicação nº 101 da CIPR define o processo de otimização de proteção radiológica:

É um processo relacionado à fonte para manter as dimensões das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade das exposições potenciais tão pequenas quanto racionalmente exequível, abaixo das restrições de dose pertinentes, considerando fatores econômicos e sociais.

A definição de uma fonte ou um grupo global de fontes é fácil e direta se a gerência operacional e os órgãos reguladores aplicarem extensivamente a filosofia da Comissão mas surgirão dificuldades se ela for distorcida.

Exemplos:

- Subdividindo artificialmente uma fonte de modo a evitar a necessidade de uma ação protetora
- Agregando excessivamente as fontes para exagerar na necessidade da ação

Na aplicação da otimização abaixo das restrições de dose, a CIPR entende a dose singular em seu sentido amplo, como um equipamento de raios X em um hospital ou a liberação de materiais radioativos originados na instalação.

De acordo com a CIPR o processo de otimização deve ser colocado em prática de uma maneira cíclica contínua que visa fornecer a melhor proteção nas circunstâncias preponderantes. Deve ser colocado em prática abaixo das restrições de dose em situações normais, de emergência e existentes controláveis.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, o processo de otimização é considerado dinâmico porque ainda que a situação de exposição pareça satisfatória, no âmbito da instalação, ou em

comparação à situações de exposição similares em outras instalações, ainda assim, pode ser possível ou necessário reduzir mais as doses, isto é, os seus resultados sempre necessitam ser ulteriormente questionados.

Links Relacionados

- [Principais características de um processo de otimização de proteção radiológica](#)

3.1.4. Referências utilizadas no processo de otimização (Serie de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, para o gerenciamento completo do desempenho de um trabalho em comparação com as previsões de um estudo de otimização ou ainda em comparação com a melhor prática em outras situações similares, não se pode usar um limite ou uma restrição de dose. Pode-se usar dois níveis de referência, a saber:

- Nível de investigação - Deve ser específico à instalação ou às operações concernentes e, portanto, geralmente, será estabelecido pela gerência no ambiente local, considerando os resultados do estudo de otimização que já foi executado. Em caso de ser excedido deve ser lembrada uma revisão da situação, para determinar as causas e, se necessário, iniciar ulteriores medidas para controlar as exposições.
- Dose coletiva alvo - É similar ao nível de investigação pois a sua aproximação ou ultrapassagem disparará uma investigação.

Links Relacionados

- [Procedimento de otimização de Proteção Radiológica aplicado ao projeto e à operação](#)
- [Técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão](#)

3.1.5. Passos a serem seguidos para um procedimento de otimização (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

Passos a serem seguidos para um procedimento de otimização de acordo com o OIEA:

1. Avaliação das situações de exposição para identificar a necessidade de um estudo de otimização.
2. Identificação e quantificação de fatores de redução de dose.
3. Análise do desempenho das opções com relação aos fatores de redução da dose e critérios de tomada de decisão.
4. Opções recomendadas para a proteção.
5. Decisão como base de um plano ALARA e sua implementação.
6. Avaliação e realimentação.

Passos a serem seguidos no desenvolvimento de um processo de otimização de acordo com a CIPR:

1. Avaliação da situação de exposição para identificar a necessidade da ação (construção do processo)
2. Identificação das possíveis ações de proteção para manter a exposição tão pequena quanto racionalmente exequível
3. Seleção da melhor opção nas circunstâncias prevalecedoras
4. Colocação em prática da opção selecionada por meio de um programa de otimização eficaz
5. Revisão regular da situação de exposição para avaliar se as circunstâncias prevalecedoras clamam para colocar em execução ações de proteção corretivas

Como desenvolver um processo de otimização passo a passo, considerando os passos a serem seguidos para um processo de otimização, de acordo com o OIEA, e o que envolve o desenvolvimento de um processo de otimização sugerido pela CIPR:

1. Avaliação das situações de exposição para identificar a necessidade de um estudo de otimização (construção do processo)
2. Identificação e quantificação dos fatores de redução das doses
3. Identificação das possíveis ações de proteção para manter a exposição tão pequena quanto racionalmente exequível
4. Análise do desempenho das opções com relação aos fatores de redução da dose e critérios de tomada de decisão
5. Opções recomendadas para a proteção
6. Determinação de solução analítica pelas técnicas de ajuda para a tomada de decisão
7. Decisão da melhor opção nas circunstâncias prevalecedoras
8. Implementação da opção selecionada por meio de um programa de otimização eficaz
9. Após a implementação da opção selecionada, avaliação dos resultados de proteção e realimentação
10. Revisão regular da situação de exposição para avaliar se as circunstâncias prevalecedoras clamam para colocar em execução ações de proteção corretivas.

Links Relacionados

- [Opção de proteção](#)
- [Revisões regulares da situação de exposição global](#)
- [Surgimento dos princípios básicos da radioproteção](#)
- [Técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão](#)

3.1.6. Revisões regulares da situação de exposição global (Serie de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

O que visam as revisões regulares da situação de exposição global na operação de uma instalação de acordo com a publicação 21 do OIEA:

- Avaliar as tendências genéricas.
- Detectar qualquer desvio possível
- Monitorar a eficácia do programa de radioproteção, incluindo o plano ALARA
- Identificar as principais áreas que necessitem de melhorias
- Determinar as futuras metas para as doses

Como podem ser detalhados os principais indicadores usados nas revisões regulares da situação de exposição global:

- as tendências anuais da dose coletiva total operacional;
- as distribuições de doses individuais anuais.

Estes Indicadores podem ser detalhados para cada categoria de trabalho e tipo de trabalhador para permitir uma melhor análise da situação.

As metas ensaiadas podem ser várias como dosimétricas, restrições de dose etc., em função do que foi estabelecido no processo de otimização.

Exemplos de indicadores menos quantificáveis, usados nas revisões regulares da situação de exposição global na operação de uma instalação, resultante de um trabalho gerencial com visão panorâmica dentre as mencionadas na publicação 21 do OIEA:

- Comprometimento, em direção da otimização da radioproteção, de todas as pessoas cujas funções estejam direta ou indiretamente relacionadas com a gerência das tarefas com radiação, desde a gerência mais elevada até os trabalhadores individuais que estão expostos à radiação.
- Nível de conhecimento destes indivíduos com relação às metas dosimétricas (por ex. educando os trabalhadores no campo, sobre assuntos relacionados às metas anuais ou de tarefas).
- Envolvimento dos trabalhadores e da gerência nos estudos de otimização da radioproteção.
- Qualidade dos sistemas de informação e eficácia na disseminação da informação.
- Educação continuada dos trabalhadores com relação às mudanças e melhorias nos processos da otimização.

Por que meios se avaliam as situações de exposição que podem identificar a necessidade de um estudo de otimização:

- Por meio de exemplos de boas práticas.
- Por comparações com outras instalações similares.
- Pelas restrições de doses para o tipo de trabalho estabelecido pela gerência ou pela autoridade regulatória.

Meios para identificar e quantificar os fatores de redução de dose a serem considerados durante o estudo de otimização:

- Globais: podem ser aplicados a todas as operações
- Específicos: específicos à otimização da proteção em trabalhos específicos.

Links Relacionados

- [A consciência por parte dos trabalhadores](#)
- [Consciência e envolvimento dos trabalhadores](#)
- [Dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização](#)
- [Educação geral do trabalhador](#)
- [Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR](#)
- [Participação dos interessados e principais atributos](#)
- [Treinamento especializado](#)

3.1.7. Dose coletiva (Publicação 101 - CIPR)

A dose coletiva foi introduzida em 1970 para servir como base para restringir o crescimento não controlado da exposição a radionuclídeos de meia vida longa no ambiente em comunhão com o desenvolvimento da indústria de potência nuclear, o que facilitaria a introdução da análise custo-benefício proposta naquela ocasião para por em execução o princípio da otimização.

Três definições de dose coletiva enunciadas pela CIPR:

- É uma medida da exposição à radiação advinda de uma fonte em um dado grupo da população.
- É a integral da distribuição das doses individuais dentro de um dado grupo da população.
- É o produto da dose média individual do grupo exposto pelo número de indivíduos que constitui o grupo.

A dose coletiva é utilizada como um indicador do desempenho para caracterizar a exposição total associada à operação da instalação durante um período de tempo fornecido, ou para um tipo de trabalho especificado. Para o propósito de comparação entre as opções de proteção no processo de otimização ela nem sempre é suficiente para a exposição laboral, para caracterizar a distribuição de dose individual quando existem grandes diferenças nas dimensões das exposições individuais dentro do grupo exposto. Neste caso, devem ser realizadas considerações de equidade de ambas as doses, individual e coletiva, associadas à distribuição da exposição.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, a dose coletiva pode ser uma entrada útil no processo de otimização quando as distribuições de dose individual são relativamente

homogêneas, bem definidas e envolvem a exposição do público. Entretanto, apresenta um problema:

Dependendo da fonte, o impacto radiológico pode ser mais ou menos espalhado geograficamente (do impacto local ao regional e, em algumas circunstâncias, ainda em áreas maiores) e no tempo (de curta duração à duração média ou, algumas vezes, à longa duração) e cobrindo um grande intervalo de doses individuais. Nestas situações, ainda que as doses coletivas possam ser estimadas nas hipóteses das rotas, os valores destas estimativas de dose coletiva para decisões de proteção são limitados.

Links Relacionados

- [Introdução às grandezas Detrimento e Dose Coletiva](#)
- [Matriz de dose coletiva e o processo de tomada de decisão na otimização](#)
- [Técnica de ajuda para tomada de decisão: custo-benefício](#)

3.1.8. Decisões relacionadas à proteção (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, os critérios são importantes no desempenho das opções porque fornecem um guia, quantitativo ou qualitativo, do que é aceitável ou desejável para um dos fatores.

Exemplos:

- Restrição de dose individual
- Valor monetário especificado da dose coletiva unitária, o valor alfa.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, os métodos quantitativos da otimização nunca devem ser a única entrada do processo porque existem muitos fatores qualitativos que devem ser considerados. Em virtude das incertezas, aproximações, interesses pragmáticos (relativos à prática), situações técnicas e econômicas ou valores sociais conflitantes há necessidade de julgamentos qualitativos.

Quando as considerações econômicas, sociais e políticas forem dominantes o processo de otimização pode ser complexo e de longa duração para se chegar às decisões de proteção relacionadas a valores de exposição relativamente pequenos.

Ainda de acordo com a publicação 101 da CIPR, em qualquer processo de otimização existe a necessidade de se tomarem numerosas decisões relacionadas à proteção considerando uma variedade de atributos:

- Os atributos são: a praticabilidade técnica, custo, fatores sociais, impacto potencial adverso, eficácia a longo prazo e o que concerne ao público ou ao trabalhador, bem como suas importâncias relativas.

- As decisões devem ainda incluir: se uma ação é realmente necessária, qual é a opção mais eficaz e eficiente e que recursos são razoáveis para completar o empreendimento.

As aptidões indispensáveis dos envolvidos no processo de otimização são: dedicação pessoal, pensamento na segurança e uma atitude questionável inerente. Devem aderir a uma eficaz cultura de segurança pelos seguintes motivos:

- As vezes um componente essencial da cultura de segurança, não é eficiente se for aplicado mecanicamente, comprometendo as boas práticas.
- Existe uma exigência de ir além da estrita colocação em execução das boas práticas de modo que todos os deveres importantes à segurança sejam conduzidos corretamente, com precaução, com o devido pensamento e completo conhecimento, com julgamentos firmes e com o próprio sentido de responsabilidade.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, pode-se gerar uma opção de proteção ótima, a ser recomendada através dos resultados da análise, considerando os custos de todos os tipos e a eficácia dos vários meios para a redução da dose.

Pode-se chegar a uma decisão final que será a base de um plano claro ALARA por meio de uma combinação apropriada do ambiente geral para otimizar a proteção ou para a abordagem de tarefas especificadas, considerando as opções ótimas propostas, fazendo uso de métodos para envolver a gerencia, os trabalhadores que podem afetar a situação e aqueles que serão afetados no processo de tomada de decisão. De acordo com a publicação 21 do OIEA, a importância do monitoramento na implementação de um plano ALARA é detectar mudanças nos indicadores e fornecer a oportunidade da realimentação, de modo que quando existe uma ulterior revisão no futuro, os dados de base a serem usados estejam claros e completos.

Links Relacionados

- [Consciência e envolvimento dos trabalhadores](#)
- [Dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização](#)
- [Exemplos de Valores monetários usados para a dose coletiva unitária](#)
- [Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR](#)

3.1.9. Diferentes passos a serem executados em um estudo de otimização (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, há diferentes passos a serem executados em um estudo detalhado de otimização para um projeto de instalação para o tratamento e condicionamento de rejeitos radioativos originados na indústria nuclear.

A título de exemplo:

A instalação é composta de duas unidades, uma de fusão para rejeitos metálicos e outra de incineração para rejeitos sólidos, líquidos e para os não combustíveis.

a) Primeira avaliação da situação de exposição com estimativas grosseiras, excluindo as tarefas de manutenção, com a finalidade de se determinar:

1. Dose coletiva;
2. Número de indivíduos expostos;
3. Valor da dose individual média por ano.

b) Estabelecimento dos objetivos do estudo de otimização. Exemplo:

- Restrição da dose individual para eliminar qualquer opção que leve a uma dose individual anual maior do que este valor.
- Redução dos valores das doses individuais e da dose coletiva, com prioridade aos maiores valores das doses individuais.
- Eliminação de todas as situações de exposição, onde o uso de equipamento de proteção respiratória torna-se necessário por mais do que duas horas.

c) Segunda avaliação da situação de exposição com uma resposta mais realista e uma descrição mais precisa das etapas do trabalho, para serem usadas como uma referencia para o estudo de otimização, reespecificando os valores dos parâmetros usados no item (a).

d) Estudo da otimização: identificação das opções de proteção.

1. Quantificação de seus desempenhos.
2. Determinação dos custos das opções.
3. Determinação dos custos de detrimento.

e) Determinação da opção ótima.

Links Relacionados

- Dose coletiva
- Técnicas quantitativas de ajuda para a tomada de decisão

3.1.10. Avaliação da situação de exposição (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

O OIEA menciona que um programa de radioproteção deve estar bem adaptado à situação em apreço e o primeiro passo é executar uma avaliação radiológica inicial da prática ou da instalação. Para todos os aspectos das operações esta avaliação deve incluir:

1. Uma identificação das fontes de rotina e das exposições potenciais, racionalmente previsíveis.

2. Uma estimativa realista das doses e probabilidades atinentes.
3. Uma identificação das medidas de proteção radiológica necessárias para satisfazer o princípio da otimização.

De acordo com o OIEA, o primeiro passo é executar uma avaliação radiológica inicial da prática ou da instalação e em uma abordagem genérica, independentemente do grau de complexidade existem dois modos principais desta avaliação:

1. Efetuar uma avaliação global de exposição para identificar as principais áreas sujeitas a melhorias e para testar a eficácia global de um programa de otimização, se ele já existe.
2. Efetuar uma análise detalhada das tarefas especificadas, de modo a examinar os agentes que contribuem com as doses associadas e determinar os meios apropriados que podem ser implementados para a redução das doses.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, no processo de otimização da proteção radiológica, para se efetivar uma avaliação radiológica global inicial, a gerência deve obter:

1. Uma visão genérica da situação de exposição para a qual é responsável.
2. Uma avaliação da evolução das exposições.
3. Uma identificação das principais áreas sujeitas a melhorias.

A CIPR considera como o coração de um programa de proteção bem sucedido a implementação do princípio da otimização e esta implementação deve:

1. Ser cuidadosamente construída considerando os atributos pertinentes à situação de exposição
2. Incluir, sempre que apropriado à situação de exposição, o envolvimento dos interessados pertinentes.

Links Relacionados

- [Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR](#)

3.2. Características do Processo e Construção do Projeto

3.2.1. Principais características de um processo de otimização de proteção radiológica (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, as principais características que um processo de otimização da proteção radiológica exige são:

1. Ser repetitivo, para evitar exposições antes que elas ocorram
2. Ser contínuo, pois considera os desenvolvimentos tanto técnicos como sócio-econômicos
3. Proporcionar julgamentos qualitativos e quantitativos
4. Ser sistemático e cuidadosamente estruturado para assegurar que foram considerados todos os aspectos pertinentes

5. Proporcionar uma disposição de espírito questionando sempre se foi feito o melhor nas circunstâncias prevalecedoras
6. Proporcionar o comprometimento em todos os graus hierárquicos em todas as organizações pertinentes bem como os recursos e procedimentos esperados

Links Relacionados

- [Otimização da proteção radiológica](#)

3.2.2. Principais indicadores (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, no estadio de projeto, em uma visão global e em uma primeira caracterização da situação de exposição, os principais indicadores que se tornaram fatores chave com relação ao desempenho das opções de proteção a serem observados são:

- A distribuição das doses individuais.
- A dose coletiva da força de trabalho, pois considera o número de trabalhadores expostos a um valor específico da dose.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, podem ser aplicadas medidas de proteção aos indivíduos ou grupos. As medidas podem ser aplicadas à fonte, ao ambiente (entre a fonte e o indivíduo) e ao próprio indivíduo.

A preferência é dada aos controles aplicados à fonte pois as suas medidas são menos destruidoras e se aplicam a todos os caminhos para todos os indivíduos, para qualquer fonte, contrapondo-se aos controles aplicados ao ambiente e aos indivíduos em que nem sempre todos podem ser abrangidos.

A otimização da proteção é um processo sistemático com visão a longo prazo por englobar considerações a partir da origem até a sepultura da fonte. A otimização durante a fase de projeto de uma instalação deve também considerar todas as fases posteriores da operação, incluindo o descomissionamento.

Links Relacionados

- [Dose coletiva](#)

3.2.3. Otimização para situações normais, existentes e de emergência (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, a proteção para as situações normais e existentes deve ser construída durante a fase de esboço de um projeto para as fontes controláveis, quando são avaliadas as opções, frequentemente para a seleção dos controles engenheirísticos e continua durante as fases operacionais e de término.

A otimização da proteção para as situações de emergência deve ser realizada por ocasião do planejamento para identificar as opções de proteção e selecionar os valores apropriados das restrições de dose. Deve ser aplicada de maneira flexível para considerar as circunstâncias reais.

3.2.4. Revisões planejadas e alimentação do processo (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, durante uma operação o processo de otimização pode ser alimentado pelo desempenho passado, pelas tendências nas análises de dose ou outros dados, pelos resultados das auditorias internas, pelas revisões observadas atentamente e pelas lições aprendidas.

Na otimização da proteção as revisões devem ser planejadas e colocadas em ação em intervalos de tempos regulares porque:

- Quando a opção selecionada é colocada em prática, as revisões podem indicar que os resultados diferem daqueles esperados e nestas circunstâncias pode tornar-se necessário um novo ciclo de avaliações.
- Os métodos usados para se julgar se as opções de proteção são racionais podem variar com o transcorrer do tempo.

A CIPR considera que a otimização da proteção radiológica é uma estrutura da mente porque:

- A efetiva colocação em execução do processo impõe que todos os interessados envolvidos conheçam e concordem com as hipóteses básicas de proteção radiológica.
- Deve assegurar que todos aqueles envolvidos no processo de otimização sejam responsáveis para a sua efetiva implementação e para tanto deve ser incentivado o conhecimento de que qualquer valor da exposição pode induzir um risco.

Links Relacionados

- [Consciência e envolvimento dos trabalhadores](#)

3.2.5. Implantação eficaz da otimização (Publicação 101 – CIPR)

O processo de otimização da proteção radiológica necessita de transparência em virtude da natureza julgadora e para tanto:

- Devem ser apresentados e definidos claramente todos os dados, parâmetros, hipóteses e valores que entram no processo da otimização.
- Deve-se supor que é fornecida toda a informação pertinente a todas as partes envolvidas e que a rastreabilidade do processo de tomada de decisão é adequadamente documentada, visando uma decisão informada.

No patamar operacional deve ser estabelecida uma estrutura organizacional para formalizar um diálogo entre as disciplinas profissionais envolvidas em uma operação, incluindo os coordenadores, os grupos que trabalham ou os comitês e diagnosticar se a estrutura resultante é ou não exclusivamente dedicada à otimização.

A implementação eficaz da otimização da proteção radiológica exige o comprometimento de todas as partes pertinentes indo das autoridades aos indivíduos expostos. Os principais elementos exigidos para se obter este comprometimento são:

- A colocação da otimização da proteção radiológica nos regulamentos, a boa vontade para obrigá-la e o fornecimento de guias com um balanço adequado entre o diálogo e o controle (autoridade).
- A definição de uma filosofia radiológica, estabelecendo as metas gerais, desenvolvendo-se e aderindo-se aos procedimentos, delegando responsabilidades, colocando meios e recursos e mantendo a independência dos profissionais de proteção radiológica daqueles da operação (gerência operacional).
- A repartição da informação, mantendo uma atitude vigilante, treinando e retreinando e um aumento consistente em proteção radiológica (indivíduos).

O princípio “BATNEEC” foi introduzido em 1992 na Conferência do Rio, como princípio organizacional central da filosofia ambiental internacional, desenvolvimento sustentável. Ele focaliza as emissões ambientais no setor não radiológico deslocando-se dos padrões de emissão guiados para a saúde em direção à redução ou, sempre que praticável, à eliminação das emissões na fonte. A CIPR aconselha que seja aplicado esse princípio e suas técnicas na liberação de efluentes radioativos, isto é, o objetivo da proteção deve estar focado na redução da emissão em vez da redução do efeito à saúde/ probabilidade do efeito, pois com as devidas considerações dos fatores sociais e econômicos, encontra-se próximo das recomendações da Comissão de manter as doses ALARA.

3.2.6. Estádio do projeto (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, o principal objetivo na construção do processo de otimização da proteção radiológica é identificar clara e sistematicamente os atributos pertinentes necessários para selecionar a melhor opção de proteção naquelas circunstâncias.

Na abordagem mais direta na construção do processo de otimização da proteção radiológica, devem ser formuladas as seguintes perguntas: *“quando, onde e por quem são recebidas as exposições?”*

A resposta esperada é um conjunto de atributos que expressam as características das populações expostas, suas exposições bem como considerações técnicas, econômicas, sociais, ambientais e éticas importantes para a situação.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, os principais indicadores a serem observados no estágio de projeto, com uma visão global e em uma primeira caracterização das exposições podem ser obtidos por meio de uma descrição genérica das principais tarefas radiológicas que

foram planejadas para serem executadas na instalação em apreço. Ela está baseada em uma estimativa grosseira:

- da frequência das tarefas executadas e suas durações;
- das taxas de dose e o número possível de trabalhadores expostos.

De acordo com o OIEA, no estágio de projeto deve ser efetuada uma avaliação mais detalhada de todas as tarefas para reduzir as doses, tanto quanto racionalmente exequível, a níveis inferiores aos valores de restrição de dose e de dose coletiva, que são os alvos, considerando fatores econômicos e sociais. Várias organizações sugeriram restrições de dose e indicadores:

a) Para os reatores de potência:

- Dose individual anual.
- Dose coletiva anual por unidade de capacidade instalada.
- Dose individual anual média na força de trabalho.

b) Para os mentores da radioproteção:

- Dose individual anual

De acordo com a publicação 101 da CIPR, na construção do processo de otimização da proteção radiológica, deve-se dar atenção para evitar:

- Acidentes em qualquer exposição potencial
- Transferência de exposição entre os grupos
- Distribuição de exposições por longos períodos de tempo e para populações distantes

Links Relacionados

- [Meios específicos à tarefa para reduzir a exposição à radiação ionizante](#)
- [Procedimento de otimização de Proteção Radiológica aplicado ao projeto e à operação](#)

3.2.7. Participação dos interessados e principais atributos (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, a participação dos interessados na identificação dos atributos para o processo de otimização não é obrigatória, mas em muitas situações pode ser uma ajuda.

Ainda de acordo com a publicação 101 da CIPR, para se formalizar opções de maneira adequada, o processo de avaliação dos atributos pertinentes a cada situação a ser otimizada se desenvolve em duas etapas:

- Na primeira faz-se uma avaliação abrangente da situação e portanto é importante a consideração de um espectro de atributos mais amplo do que o necessário para a avaliação da situação de exposição.

- Na segunda etapa faz-se a análise dos atributos considerados válidos na primeira etapa e excluem-se os atributos que foram considerados “demais” quando um número menor seria suficiente.

Como deve ser formada a equipe cerne que proporciona a direção e o planejamento do processo de otimização de acordo com a publicação 21 do OIEA:

Ainda que o presidente (ou o facilitador) da equipe cerne possa ser um membro do departamento de radioproteção, a maioria dela deve ser representativa dos grupos de trabalho não alocados ao departamento de radioproteção.

Links Relacionados

- [Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR](#)

3.3. Envolvimento dos Interessados

3.3.1. Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, no processo de otimização, além do tomador de decisão (geralmente o gerente operacional) e da autoridade competente, podem ser considerados interessados:

- os indivíduos expostos à radiação (tanto trabalhadores quanto membros do público)
- seus representantes (sindicatos, associações locais)
- suporte técnico institucional ou não institucional para o processo de tomada de decisão (serviços dosimétricos aprovados, especialistas qualificados, serviços técnicos formais, organizações de especialistas públicos, laboratórios particulares)
- representantes da sociedade, tanto por um processo eletivo (representantes eleitos) como por um processo participativo (associações ambientais).

São vantagens do envolvimento dos interessados no processo da otimização:

1. Proporcionar um meio comprovado para se obter a incorporação de valores no processo da tomada de decisão, melhorar significativamente a qualidade das decisões, a resolução dos conflitos entre interesses competidores, a construção do conhecimento compartilhado com ambos, trabalhadores e público e a construção da confiança nas instituições.
2. Reforçar a cultura de segurança e introduzir a flexibilidade necessária no gerenciamento do risco radiológico que é necessário para se obterem decisões mais eficazes e sustentáveis.
3. Ajudar na identificação dos atributos da situação de exposição e suas importâncias relativas, bem como na identificação das opções de proteção dentro da concepção do processo de tomada de decisão.

Links Relacionados

- [Participação dos interessados e principais atributos](#)

3.3.2. Consciência por parte dos trabalhadores (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, a consciência, por parte dos trabalhadores, tem um papel importante na redução das doses porque os indivíduos que executam tarefas em áreas com radiação podem contrair grandes efeitos sanitários maléficos com suas próprias exposições.

O envolvimento na fase de planejamento fornece uma oportunidade de aplicar a experiência e as lições aprendidas ao desenvolvimento do plano. Isto permite aos indivíduos tornarem-se mais conhecedores dos riscos potenciais e desenvolver um comprometimento com o plano.

O conhecimento de ambos os planos ALARA, global e específico à tarefa, inclui a familiaridade com as metas de ambos, exposição anual e exposição específica à tarefa. Isto melhora a atitude e a atenção aos detalhes que o indivíduo possui no desempenho de seu trabalho e leva a uma redução nas exposições.

Links Relacionados

- [Educação geral do trabalhador](#)
- [Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR](#)

3.3.3. Dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, a dimensão do envolvimento dos interessados no processo de otimização é variável e depende da situação em consideração porque em virtude das circunstâncias pode não ser necessário envolver todos os interessados ou tipos de interessados em cada aspecto ou fase do processo da otimização.

Muitas das decisões de proteção não são complexas ou socialmente contenciosas, desta maneira não necessitarão o envolvimento amplo dos interessados.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, não existe uma abordagem única em diferentes áreas para estruturar o processo de unificação dos interessados no processo de tomada de decisão.

Ela cobre um espectro de processos clássicos de consulta em um terminal e as técnicas de construção estruturada do consenso com ou sem a assistência de uma terceira parte no outro terminal.

3.3.4. Responsabilidade da decisão final (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, apesar do envolvimento dos interessados, a responsabilidade da decisão final a respeito da opção de proteção a ser implementada como resultado do processo de otimização permanece com a gerência operacional e/ ou autoridade regulatória.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, são considerado pertencentes à gerencia:

- Os oficiais de radioproteção (também conhecidos como gerentes de física sanitária ou oficiais de física sanitária).
- Gerentes responsáveis pela produção ou outros aspectos de uma organização, como o controle financeiro, para os quais a segurança, também, seria uma consideração integral.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, são envolvidos alvo e devem estar comprometidos com a otimização da proteção:

- A gerencia.
- Os trabalhadores que estão sendo protegidos e seus representantes.
- O pessoal da autoridade regulatória com a finalidade de esclarecer como os operadores podem cumprir a exigência regulatória com relação à otimização.

Links Relacionados

- [Responsabilidades gerais das autoridades competentes](#)

3.4. Avaliação e Análise das Tarefas Específicas

3.4.1. Avaliação prévia das tarefas a serem realizadas (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, entende-se por "exposição laboral" todas as exposições de trabalhadores incorridas no curso de seus trabalhos, com exceção das exposições excluídas dos padrões e as exposições das práticas e fontes isentadas pelos padrões.

Antes de se começar o trabalho, no planejamento de todas as tarefas que possam levar a uma exposição laboral, devem ser avaliados os valores das doses individuais e da dose coletiva, diretamente ligadas à tarefa. A avaliação deve ser executada pelo grupo de trabalho responsável, que é o grupo que realmente estará realizando a tarefa, em estreita cooperação e com a assistência do grupo de radioproteção.

Objetivos de uma avaliação previa dos valores da exposição, no desenvolvimento das tarefas a serem efetuadas, antes de se começar o trabalho com radiação ionizante:

- Obter os elementos necessários relacionados às metas dosimétricas para identificar e elaborar o trabalho.
- Identificar as condições de exposição (i.e. onde, quando e como os trabalhadores estão expostos).
- Manter unidos os indivíduos apropriados em ambos os grupos, responsável pelo trabalho e de radioproteção.
- Identificar as tarefas a serem ulteriormente analisadas para melhorar a proteção radiológica.

Para avaliar a necessidade de uma ulterior análise para identificar as opções de redução das doses, pode ser útil introduzir um valor referencia em termos das doses individuais ou coletivas, de maneira tal que se a exposição estimada de uma tarefa fosse exceder este valor predeterminado deverá ser efetuada a ulterior análise, acompanhada por um gerente sênior para a verificação da avaliação e planejamento dos esforços.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, em vez de se introduzir um valor referencia (doses individuais ou coletivas) pode ser realizada uma comparação com os resultados obtidos anteriormente, para o mesmo tipo de tarefa (tanto na instalação em apreço como em outra comparável) que possa revelar se pode ser obtido um melhor desempenho. Neste caso, não unicamente a tendência da dose coletiva, mas, também é significativa a evolução dos principais parâmetros que contribuem para a exposição (as taxas de dose, a duração da tarefa e o número de trabalhadores).

3.4.2. Ordem detalhada dos passos de uma tarefa de otimização (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, deve ser realizada uma descrição detalhada da tarefa a ser otimizada. Deve-se seguir os seguintes passos:

Descrição da tarefa

1. Condição de exposição: avaliação das taxas de dose, contaminação de superfície
2. Condições de trabalho: determinação do período de exposição, temperatura local, claridade e suporte especial
3. Equipe e equipamento identificação da necessidade de ferramentas e equipamento, especialistas e trabalhadores
4. Coordenação: identificação de outras tarefas que possam influenciar as condições de trabalho e o campo de radiação no local de trabalho

Análise da Tarefa

1. Medidas de redução das doses: identificação da possível melhoria no equipamento, ferramenta, roupa de proteção e aparelhos, blindagem e medidas para a redução do espalhamento da contaminação
 - Restrições de doses individuais; alvos de dose coletiva
 - Conhecimento das tarefas similares no passado e práticas bem gerenciadas
2. Planejamento do trabalho: determinação do período ótimo de exposição, do número de trabalhadores, tempo fixado e organização do trabalho
3. Doses: avaliação da distribuição da dose individual esperada e da dose coletiva
4. Preparação da realimentação: identificação dos parâmetros necessários para seguir o desempenho da tarefa para os propósitos de revisões pós-tarefa ou de realimentação

De acordo com o OIEA, deve-se realizar uma análise periódica para todas as radiações relacionadas às tarefas da instalação em apreço, de modo a determinar o que deve ser feito para reduzir os valores das doses, ainda que eles pareçam satisfatórios.

O propósito destas análises é identificar os possíveis fatores que contribuem para os valores das doses que podem ser melhorados ou mudados. Devem estar baseados em uma descrição precisa de todas as tarefas executadas no trabalho, em termos radiológicos, termos ambientais (o que se iguala a uma descrição da área). Isto significa que necessitam ser obtidas informações detalhadas a respeito do tempo de exposição, do número de trabalhadores envolvidos, das taxas de dose no ambiente das áreas de trabalho, do uso de roupas de proteção, de procedimentos e de ferramentas e a configuração das áreas de trabalho (incluindo critérios ergonômicos, a possível posição da blindagem, andaimes, materiais e ferramentas).

Links Relacionados

- [Otimização da proteção radiológica](#)

3.4.3. Como obter os dados necessários ao processo de otimização da proteção radiológica (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

Na descrição da tarefa no planejamento da otimização, devem participar na coleta de dados e na análise da tarefa os grupos de trabalhadores que interagem na preparação ou desempenho desta tarefa e que estão diretamente envolvidos na identificação dos meios para reduzir as exposições.

No âmbito de uma instalação, um meio importante para assegurar a eficácia da avaliação em situação de exposição à radiação ionizante é criar um completo sistema de informação que possibilite a coleta, análise e armazenagem dos dados. Estes dados não são unicamente dosimétricos, mas também podem estar relacionados a outros fatores como desempenho da tarefa ou condições de trabalho prevalecedoras.

Os dados podem ser coletados antes, durante e depois da realização da tarefa. Em alguns casos o modo mais eficaz de obter os dados é fazer uso de registros completos efetuados, tanto pela equipe de radioproteção, como pelos chefes das tarefas, tanto durante como no fim do trabalho. Em situações complexas de exposição (aquelas que envolvem várias fontes ou vários tipos de tarefas) pode ser útil na coleta das informações o uso de um computador, associado a um sistema dosimétrico operacional eletrônico.

No âmbito de projeto de uma instalação ou em uma nova tarefa, ou ainda quando não se dispõe de nenhuma informação, um meio importante para assegurar a eficácia de avaliação de uma situação de exposição é fazer uso de programas de processadores "software" para facilitar o que segue:

1. Avaliações das taxas de dose e suas possíveis evoluções com o transcorrer do tempo;
2. Simulações das tarefas planejadas em seu ambiente;
3. Combinações de dados, a partir de todas as tarefas planejadas (taxas de dose no ambiente, extensão do tempo de exposição e número de trabalhadores expostos) na instalação em questão, de modo a obter indicadores mais genéricos.

Para a avaliação de uma situação de exposição as revisões ou as auditorias externas, podem ser úteis para a avaliação da consciência dos trabalhadores ou outros tipos de fatores humanos, ou ainda organizacionais, que levaram a um desempenho pobre. Nesta auditoria duas instalações podem se unir para a avaliação de uma delas pela outra e vice-versa.

O OIEA, com a finalidade de auxiliar os países membros na avaliação das situações de exposição, desenvolveu um Sistema de Informação para a Autoridade Regulatória (SIAR). O SIAR consiste em 5 módulos e fornece, para a autoridade regulatória dos países membros, a informação necessária a respeito da exposição laboral para o seu monitoramento em operações com segurança. Fornece, também, comparações com os níveis de referência, como níveis de investigação, restrições de dose e limites de dose e relata as doses que excederam estes níveis de referência.

Para a avaliação das condições de exposição à radiação ionizante, podem ser obtidas bases de dados internacionais:

- nos relatórios do Comitê Científico sobre os Efeitos das Radiações Atômicas, das Nações Unidas – CCERANU, para o ciclo do combustível nuclear, usos médicos da radiação, usos industriais, fontes naturais e a defesa relacionadas a estas atividades
- no Sistema de Informação sobre Exposição Laboral – SIEL, da OECD - NEA, co-patrocinado pelo OIEA, para plantas de potência nuclear.

Links Relacionados

- [Estádio do projeto](#)

3.4.4. Distribuição da exposição à radiação ionizante nas atividades humanas (Publicação 101 – CIPR)

Cada grupo da população afetado por uma fonte de radiação ionizante, para fins de otimização da proteção radiológica, pode ser descrito por determinados atributos.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, os atributos podem ser descritos pela idade, sexo e hábitos, bem como por vários parâmetros de exposição, como doses individuais médias, mínimas e máximas, número de indivíduos expostos, dose coletiva e probabilidade de exposição potencial.

Um aspecto importante na comparação das ações de proteção no processo de otimização da proteção radiológica é a equidade na distribuição de doses individuais entre os diferentes grupos de indivíduos expostos.

Exemplo de como podem ser descartadas opções de proteção partindo da exigência da equidade: supondo que estes grupos de indivíduos possuam doses coletivas individuais médias similares; por consideração da equidade poderão ser descartadas as opções que apresentem as exposições mais elevadas.

Como se pode obter informações a respeito do espectro de doses individuais à radiação ionizante para o público:

Para o público a distribuição de dose não é diretamente acessível. Neste caso podem ser estimadas as doses individuais médias para diferentes subgrupos expostos a uma dada fonte. Para este tipo de abordagem é necessário definir o local sem habitação (distância a partir da fonte), distribuição da idade e do sexo e hábitos de vida (dieta, tipo de recreação) para cada grupo de indivíduos expostos.

3.4.5. Distribuições da exposição à radiação ionizante no tempo e no espaço (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, a dose efetiva total não é útil na ajuda da tomada de decisão quando as exposições ocorrem em grandes populações, em grandes áreas geográficas e grandes períodos de tempo pois ela agrega excessivamente a informação e pode tornar-se desencaminhante na seleção das ações de proteção.

Em virtude disso, a sua aplicação direta pode acarretar:

- Mascaram as características de exposição da distribuição de dose bem como as incertezas inerentes à avaliação das doses
- Impossibilitar uma ponderação a respeito de considerações sociopolíticas importantes, por exemplo equidade, que pode ser especificamente importante para avaliar e comparar as opções

Para superar as limitações associadas a esta dose coletiva deve-se analisar cuidadosamente cada situação de exposição à radiação ionizante para identificar as características individuais e

os parâmetros de exposição que melhor descrevem a distribuição de exposição entre a população envolvida na circunstância específica. Isso resulta na identificação de vários grupos de população com características homogêneas a serem consideradas no processo de otimização. No caso da dose coletiva resultar de um intervalo muito amplo de doses individuais, ela deve ser desagregada em uma série de doses coletivas que correspondem a partes homogêneas da distribuição de doses. As características adequadas que definem os grupos da população que correspondem a estas doses coletivas devem ser conseguidas na base de caso por caso de acordo com a situação de exposição.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, para identificar os grupos da população que entram na determinação das respectivas doses coletivas pode ser usada a abordagem mais direta que consiste em se perguntar: “quando, onde, como e por quem são recebidas as exposições?”. A resposta esperada é um conjunto de atributos que expressam as características das populações irradiadas, suas exposições, bem como considerações técnicas, econômicas, sociais, ambientais e éticas importantes para a situação.

Conforme demonstrado na figura 10, além da dose coletiva para diferentes grupos da população em função de sua localização espacial e dos intervalos de dose individuais, poderiam ser consideradas outras características, caso sejam pertinentes, como a idade, o sexo, categorias profissionais, hábitos específicos, e para períodos de exposição muito longos, as gerações envolvidas.

Figura 10: Distribuição da dose coletiva para diferentes grupos

3.4.6. Matriz de dose coletiva e o processo de tomada de decisão na otimização (Publicação 101 – CIPR)

Após o estabelecimento da matriz de dose coletiva pode-se considerar a importância relativa de cada elemento que a compõe para espelhar as considerações e os valores econômicos e sociais bem como as preferências dos envolvidos no processo da otimização. Alguns tipos de ponderação:

1. A natureza das considerações e os valores podem variar apreciavelmente para cada caso, como a determinação da importância dada pelos interessados a cada elemento.
2. O grau de incerteza no valor da exposição ou em qualquer outro fator importante, como por exemplo para considerações de equidade. Para esta última podem ser prescritas ponderações relativas a cada dose coletiva baseadas na dimensão da dose individual média que caracteriza um dado grupo da população. Isto pode ser um modo para dar mais importância aos grupos de indivíduos que recebem doses mais elevadas daqueles que recebem doses menores.
3. Uma função do tempo em que é prevista a ocorrência da exposição. Como existem incertezas nas estimativas das doses e o detrimento associado aumenta para exposições a serem recebidas no futuro longínquo, o uso das exposições previstas para os propósitos de tomada de decisão torna-se enormemente problemática. Como consequência deve ser dada uma menor importância progressiva para as exposições individuais recebidas em futuro longínquo por causa do aumento nas incertezas, tanto nas estimativas de dose como no detrimento, que podem não ser mais válidos para as populações futuras.
4. Em oposição à anterior, em situações específicas, pode ser dada mais importância às exposições que ocorram no futuro, baseada em considerações de equidade inter-gerações ou ainda em evidências científicas não esperadas.

A respeito da dose coletiva, quando ocorrem exposições que cobrem muitas gerações, A CIPR sugere que o período de tempo não ultrapasse algumas gerações, pois o estado atual do conhecimento e a nossa habilidade de prever o caminho para a população e as rotas de exposição não permitem períodos de tempo maiores.

3.5. Meios Para Reduzir a Exposição à Radiação Ionizante

3.5.1. Meios gerais para reduzir a exposição à radiação ionizante (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, as principais considerações e observações a serem realizadas antes de se efetuar o estudo de otimização da proteção radiológica de uma tarefa são:

1. Deve-se considerar que a tarefa deve ser executada em consonância com as demais tarefas a serem efetuadas e com as condições radiológicas a serem encontradas.
2. A dose evitada deve encontrar-se balanceada contra a duração da tarefa e o custo envolvido no trabalho.

3. Deve-se observar que:

- na otimização os recursos gerenciais devem ser tratados separadamente daquele relativo ao gerenciamento do trabalho.
- um aumento no número de trabalhadores para reduzir as doses individuais, algumas vezes aumentará a duração na execução da tarefa e resultará em uma exposição coletiva maior.

Com relação ao fato de que a tarefa deva ser executada em consonância com as demais tarefas a serem efetuadas e com relação às condições radiológicas a serem encontradas, o OIEA fornece como exemplo a tubulação do sistema de refrigeração e seus componentes de uma planta de potência nuclear e afirma que no desligamento do reator as taxas de dose nas proximidades da tubulação e seus componentes aumentam bastante. Portanto, o trabalho nestes sistemas deve ser programado para antes do desligamento ou bem depois dele, para permitir a limpeza dos trocadores iônicos e filtradores, bem como para permitir um tempo de decaimento radioativo.

3.5.2. Educação geral do trabalhador (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, para a otimização da proteção e para o controle da exposição à radiação ionizante, o trabalhador deve possuir:

- Um treinamento radiológico básico, que é uma exigência para obter o acesso inicial a qualquer área com radiação e para executar trabalhos nela.
- Um treinamento de requalificação efetuado em intervalos prescritos.

Em uma primeira etapa da educação do trabalhador, na qual se exige uma compreensão básica da proteção radiológica há um programa mínimo a ser coberto, tanto no treinamento básico, como naquele de requalificação com a finalidade da otimização da proteção nas atividades envolvendo a radiação ionizante:

- No treinamento básico, no mínimo deveriam ser cobertos os aspectos básicos de tempo, distância e blindagem e como eles se relacionam com a otimização da proteção.
- No treinamento de requalificação deve-se incluir uma reminiscência do treinamento básico e uma revisão dos novos regulamentos, documentos guia e protocolos de trabalho, pertinentes ao conceito de otimização.

Além do programa mínimo, os trabalhadores devem possuir outros conhecimentos:

1. Uma familiaridade com o ambiente de trabalho e com a sua vizinhança física.
2. Uma compreensão das práticas básicas e dos princípios que eles devem empregar nos ambientes radiológicos em que eles prestam serviço (como áreas de radiação elevadas, de contaminação de área e de atividade suspensa no ar).
3. Em assuntos práticos como se vestir e despir com a roupa de proteção, como fazer uso de capelas, luvas etc.
4. Uma noção do tempo gasto na área com radiação e consciência das taxas de dose em geral e as mais elevadas, bem como os pontos de espera com taxas de dose menores.

Com relação ao treinamento básico exigido aos trabalhadores, para o processo de otimização da proteção radiológica, a CIPR fornece como exemplo um programa de aprendizado em processador (software) destinado a explicar a otimização da radioproteção, conhecido como “RADIOR”, disponível pelo OIEA., em inglês, francês, alemão, russo, espanhol e sueco. O programa inclui módulos sobre radiação ionizante, gerenciamento dos riscos radiológicos, aplicação do princípio de otimização e um teste dos conhecimentos auferidos. Apresenta, também, um exemplo prático da aplicação do princípio da otimização na indústria nuclear.

Links Relacionados

- [Consciência e envolvimento dos trabalhadores](#)
- [Melhoria na comunicação](#)
- [Treinamento especializado](#)

3.5.3. Consciência e envolvimento dos trabalhadores (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, pode ser obtida uma restrição na exposição com o envolvimento dos trabalhadores, em um processo de avaliação, revisão posterior ao trabalho e processo de realimentação. Por meio destes processos pode ser obtida muita informação valiosa advinda dos trabalhadores. O fórum para a realimentação e a revisão do processo necessita de uma discussão aberta, pois os trabalhadores necessitam estar seguros de que seus argumentos sejam apreciados e possam beneficiar o processo de otimização.

Além do envolvimento dos trabalhadores no processo de avaliação, revisão posterior ao trabalho e processo de realimentação, outras atitudes poderiam aumentar a sua conscientização e diminuir a exposição:

1. Colocando lembretes informando os perigos potenciais e a necessidade de minimizar a exposição em locais convenientes. Eles são mais eficazes se possuírem dimensões e cores diferentes e forem reconhecidamente diferentes de outros avisos informativos. Eles devem ser reconhecidamente considerados importantes para a otimização da proteção pelos trabalhadores.
2. Usando dosímetros eletrônicos com mostradores de fácil visão dos valores corriqueiros da dose acumulada e dos valores da radiação presente, pois são eficazes em advertir os trabalhadores das condições radiológicas prevalecedoras.
3. Colocando os resultados dos levantamentos radiológicos nas entradas das salas nas quais existe algum tipo de perigo radiológico.
4. Em áreas com taxas de dose elevadas, seja estabelecido um controle de acesso, tanto com o uso de cadeados, como exigindo o acompanhamento por uma pessoa designada, dos trabalhadores que entram na área. Os motivos dos controles de acesso devem ser explicados aos trabalhadores para evitar que sejam tentados a burlarem o controle por ignorância.

5. Junto com a rotulagem regulamentar apropriada de material radioativo, nas etiquetas, acrescentar outras informações, como instruções de manuseio ou detalhes das ferramentas de manuseio necessárias.

O OIEA fornece um exemplo na qual o envolvimento dos trabalhadores no processo de otimização da proteção radiológica abaixaram os valores das doses. O exemplo envolveu um equipamento de radiografia industrial móvel, para o qual foi detectado que cerca de 1/3 dos trabalhadores receberam doses anuais superiores a 5mSv.

As investigações identificaram os seguintes motivos das doses serem superiores ao necessário:

- Condições de trabalho difíceis.
- Falhas em observar os procedimentos operacionais estabelecidos em cumprimento aos regulamentos de proteção radiológica.
- Uso de equipamento velho (obsoleto).

Como resultado foi determinado que uma das medidas mais eficazes para reduzir as doses seria o treinamento e o levantamento da consciência dos trabalhadores, o que foi feito com o envolvimento da autoridade regulatória e as companhias que empregavam os radiografistas.

Links Relacionados

- [Melhoria na comunicação](#)
- [Revisões planejadas e alimentação do processo](#)

3.5.4. Melhoria na comunicação (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, no processo de otimização da proteção radiológica, deve ser realizada a comunicação com a finalidade de reduzir a exposição. A comunicação pode ser realizada diretamente ou por um processo formal. Deve envolver regularmente, todos os graus de gerenciamento, supervisores e a força de trabalho.

No processo de otimização da proteção radiológica, o OIEA fornece uma sugestão para a melhoria na comunicação:

O OIEA, como forma simples de comunicação, propõe o uso de caixas de sugestões em vários pontos da instalação para o trabalhador comunicar idéias, lições aprendidas e boas práticas. A informação a ser fornecida em sua forma deve incluir a pertinência, qualquer proposta para lidar com ela e o nome do indivíduo que a submeteu (este último é opcional). A pessoa encarregada de responder à sugestão deve avaliar o problema e qualquer solução proposta. Para qualquer proposta independentemente de ser procedente ou não, deve ser enviada uma resposta, por escrito, que explique o resultado da avaliação, aos indivíduos que deram a sugestão.

Links Relacionados

- [Consciência e envolvimento dos trabalhadores](#)

- Envolvimento dos interessados de acordo com a CIPR
- Melhoria na comunicação

3.5.5. Meios específicos à tarefa para reduzir a exposição à radiação ionizante (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

Projeto da instalação e do equipamento:

Os meios mais eficazes, específicos à tarefa no projeto da instalação e do equipamento, para a redução da exposição são:

- Possuir um projeto inicial da instalação que considere completamente a exigência de otimizar a proteção.
- Possuir um bom projeto de equipamento.

O OIEA fornece exemplos extremos para um bom projeto inicial de instalação do ponto de vista da otimização da proteção radiológica:

a) Os exemplos extremos que o OIEA fornece são:

- a eliminação completa das incorporações de radionuclídeos pelo uso de recipientes e manuseio remoto;
- possuir um conjunto de radioterapia para eliminar a exposição externa, fazendo uso de operação remota e blindagem;

b) Os envolvidos nos projetos das instalações devem estar completamente familiarizados com as consequências da exigência de otimização.

O que deve ser considerado em um projeto de equipamento para que seja eficaz na redução da exposição à radiação ionizante:

- Deve-se considerar completamente a exposição dos trabalhadores que vão usá-lo e para tanto torna-se necessário um compreensivo sistema de garantia da qualidade para assegurar que a construção, a operação, a manutenção e a modificação de fontes e equipamentos satisfaçam as exigências pertinentes.
- Deve-se considerar completamente as capacidades humanas.

Além do bom planejamento de uma instalação e do projeto de um equipamento, as modificações de projeto podem ser eficazes na redução da exposição. O OIEA fornece alguns exemplos:

1. Instalação de blindagem permanente onde se usa blindagem temporária.
2. Melhorias no acesso a áreas com radiação, permitem o aumento de capacidade no desempenho das tarefas. A eficiência aumentada intensifica a segurança e reduz a exposição.
3. Modificações de projeto que incorporem a otimização da proteção junto com a segurança industrial melhorada e a produção aumentada. Esta combinação pode tanto

cortar custos como reduzir a exposição. Torna-se importante elemento da otimização, quando ela cruza os limites com outros programas e pode levar a melhorias em mais do que um programa.

São duas as etapas para a modificação de projeto quando a instalação já se encontra em operação:

1. Fazer uma avaliação inicial, em um tempo razoável, necessário para requisitar a engenharia e efetuar o orçamento.
2. Em seguida fazer uma avaliação completa, em termos de redução na exposição da radiação ionizante, exequibilidade e custo.

No exemplo do OIEA, a respeito da manutenção em componentes como os geradores de vapor, com relação a armações permanentes, em vez de temporárias, quais são as vantagens que elas trazem?

1. Existe uma diminuição da dose quando as armações não necessitam serem instaladas a cada ciclo de recarga.
2. As doses recebidas durante a instalação só são recebidas uma vez.
3. As plataformas permanentes são inerentemente mais seguras e desta maneira apresentam um risco reduzido em termos de segurança industrial.
4. Os trabalhadores podem executar as suas tarefas mais eficazmente, sem a massuda couraça de segurança necessária na armação temporária.

Em uma avaliação para a substituição de uma armação temporária, por uma permanente, o que se deve mostrar à gerência:

- A redução de custo de trabalho causado pela desnecessidade de se construir e remover armações temporárias.
- A redução de custo de trabalho como resultado da eficácia aumentada no trabalho (menor tempo, significa, menor gasto).
- Que a segurança industrial aumentada, propicia uma confiança nela, aumentada por parte dos trabalhadores.
- Que existe uma redução na exposição à radiação, em virtude de não haver a necessidade de construir e remover armações temporárias.
- Que existe uma ulterior redução na exposição à radiação, pela eficácia aumentada no trabalho.

Links Relacionados

- [Estádio do projeto](#)

3.5.6. Redução do tempo de exposição, número de trabalhadores e taxas de dose (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

Redução do tempo de exposição dos trabalhadores

Na redução do tempo gasto em áreas com radiação, o planejamento é um elemento essencial porque se o tempo gasto for reduzido de maneira tal que a qualidade do resultado não for boa, o trabalho deverá ser repetido, aumentando a exposição.

Para a redução do tempo gasto, em áreas com radiação pode ser considerado:

- Que todas as ferramentas necessárias, abastecimentos e outros equipamentos estejam disponibilizados nos locais de trabalho, que estejam em bom estado de conservação e funcionando de acordo e que sejam adequados para as tarefas executadas.
- Que a força de trabalho esteja familiarizada com as tarefas a serem executadas. Esta familiaridade pode ser adquirida por prática ou simulações da tarefa. Para não haver um desequilíbrio potencial nas doses é conveniente que vários trabalhadores estejam familiarizados com a mesma tarefa.
- Que seja avaliada a eficácia da roupa e equipamento de proteção. Deve-se verificar a duração do trabalho com e sem a roupa e equipamento de proteção, bem como as doses a serem recebidas. Geralmente, encontra-se que o uso de roupas de proteção aumenta o tempo gasto para executar a tarefa e conseqüentemente, a dose causada pela radiação externa, mas reduzirá a exposição interna ou a sua probabilidade, para as quais as estimativas são menos confiáveis.

O OIEA menciona alguns fatores para o aumento do tempo de exposição e fornece alguns exemplos:

1. Condições de trabalho insatisfatórias. O OIEA fornece, como exemplo, que na manutenção em plantas de potência nuclear, a luz inadequada de uma área de trabalho, condições barulhosas, em áreas sem o uso de conectores de áudio, entre os trabalhadores ou a congestão, podem aumentar o tempo de exposição, em até 20% sobre aquele gasto no trabalho executado com a luz adequada ou em uma área aberta.
2. Infortúnios e condições de trabalho insatisfatórias. O OIEA fornece como exemplos a manutenção rotineira e operações pos-incidente, em plantas de potência nuclear, que aumentaram o tempo de exposição em cerca de 20 a 30 %, em média. As principais causas de infortúnios foram:
 - Preparação do trabalho inadequada (por exemplo, armações não adequadas para a situação, problemas de planejamento)
 - Ferramentas impróprias ou de mau funcionamento.
 - Falta de treinamento.
3. Uso de roupas e equipamentos. O OIEA fornece como exemplo, que em uma área congestionada, o uso de uma vestimenta , totalmente de borracha, com um capuz fornecedor de ar, pode aumentar o tempo de trabalho em até 30% sobre aquele, para o mesmo trabalho, executado com uma vestimenta, totalmente de algodão. Para o

mesmo trabalho, o uso de vestimentas completas de borracha e máscaras faciais completas, fornecedoras de ar, que fornecem o mesmo grau de proteção, contra a contaminação interna, mas que são muito mais embaraçosas, podem aumentar o tempo de trabalho necessário em até 65%.

Redução do número de trabalhadores necessários

De acordo com a publicação 21 do OIEA, para reduzir a dose coletiva, pode ser diminuído, em número, o pessoal que executa reparos em tarefas que:

- não necessitam do contato físico da vizinhança do componente em apreço ou da área na qual é executado o trabalho. Este pode ser removido para uma área de menor radiação ionizante;
- tenha à disposição o uso de vídeo remoto, áudio e telemetria dosimétrica.

Redução nas taxas de dose

Para a redução nas taxas de dose, o OIEA sugere as seguintes metodologias:

1. Em instalações com sistemas de tubulações que contenham fluidos radioativos o OIEA sugere a aplicação de controles sobre os sistemas químicos, de filtração, de troca iônica e de fluxo.
2. Em ambientes de reatores o OIEA sugere melhorias na química da água, modificações no desligamento do reator e o uso de injeções de zinco.
3. Na área médica com mudanças nos procedimentos médicos como na carga e após carga em braquiterapia.
4. Em salas, áreas ou componentes contaminados pelos processos de descontaminação. Neste caso, as doses evitadas pela descontaminação devem considerar as doses recebidas durante o processo de descontaminação.
5. Uso de blindagem temporária.
6. Uso de equipamento de proteção pessoal. Neste caso deve ser verificada a perda da eficácia como, por exemplo, no uso de aventais de chumbo em radiodiagnóstico e na radiologia interventora.
7. Avaliação da orientação do corpo do trabalhador, com relação à orientação da fonte de radiação. Esta avaliação é importante, principalmente, no manuseio de fontes médicas e nas aplicações de radiografia.
8. Uso de ferramentas longas ou de operação por meio de controle remoto.

Para a instalação de blindagem temporária com a finalidade de reduzir as doses:

1. Devem ser avaliadas as doses que serão recebidas pelos trabalhadores durante a execução do trabalho com e sem a blindagem. A diferença entre estas doses estimadas deve ser comparada com as doses que serão recebidas na instalação e remoção da blindagem temporária. Se a redução nas doses a ser realizada pela instalação da blindagem não excede as doses recebidas durante a instalação dela, então, não deve ser instalada. A avaliação deve considerar também qualquer dose que possa ser evitada por outro trabalho que estaria sendo executado na vizinhança da blindagem proposta para ser instalada.

2. Deve ser adaptado, o quanto possível, à área de trabalho, de modo que a instalação da blindagem não a reduza de modo tal, que possa aumentar apreciavelmente a duração do trabalho subsequente e desta maneira o período de exposição dos trabalhadores.
3. Devem ser avaliadas, também, áreas de menores valores de radiação ionizante. Existem circunstâncias em que a instalação da blindagem temporária parece benéfica, porem, as doses evitadas podem ser passíveis de não poderem ser quantificadas.
4. Deve ser avaliada a proximidade da fonte. Quanto a fonte for mais próxima da blindagem temporária, mais eficaz será a redução das taxas de dose.

Links Relacionados

- [Distribuição da dose no tempo](#)
- [Distribuições da exposição à radiação ionizante no tempo e no espaço](#)
- [Dose coletiva](#)
- [Dose coletiva para diferentes grupos da população](#)

3.5.7. Treinamento especializado (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 21 do OIEA, um treinamento especializado no processo da otimização deve apresentar as seguintes características:

1. Deve ser realizado como uma segunda etapa do treinamento básico para fornecer maiores detalhes.
2. Deve possibilitar que sejam fornecidas maiores responsabilidades aos trabalhadores.
3. Deve ser comensurável com os riscos aos trabalhadores.
4. Deve ser ministrado antes da execução de qualquer trabalho para o qual a exposição à radiação ionizante possa ser grande.

O treinamento especializado pode permitir características que podem favorecer em dimensão normal, com exercícios:

1. Aos trabalhadores para efetuarem as suas tarefas práticas sem a presença do risco da radiação.
2. Para encontrar os problemas que podem surgir durante o desenvolvimento da tarefa.
3. Para identificar falhas nas habilidades individuais como nas ferramentas.
4. Que possam ser realizados nas condições reais do ambiente de trabalho.
5. Simulem adequadamente a situação real, por exemplo, com o uso da roupa de proteção e equipamento respiratório.
6. Para estudos de tempo e de movimentação para identificar problemas específicos à tarefa a ser executada.
7. Para estudos de orientação do corpo do trabalhador no campo de radiação, com a finalidade de reduzir a sua dose.

Links Relacionados

- [Educação geral do trabalhador](#)

3.6. Definição e implementação de um plano ALARA visando a proteção radiológica

3.6.1. Estrutura para um plano ALARA (Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

Os elementos comuns para a maioria dos programas básicos de otimização da proteção radiológica são:

1. Um bom trabalho de gerenciamento.
2. A educação dos trabalhadores a respeito dos princípios básicos de radioproteção e otimização, aumentando a conscientização por parte da força de trabalho a respeito do processo de otimização.
3. As características de um processo de comunicação eficaz.

Para o gerenciamento ALARA o OIEA sugere em sua publicação 21 uma estrutura específica:

1. Um Comitê ALARA. Ele é responsável para aprovar e rever o plano ALARA. Ele se encontra periodicamente para rever o desempenho da instalação em apreço, com relação à radioproteção, para avaliar as sugestões para reduzir as doses e para fazer recomendações à gerência mais elevada. Os membros do Comitê são selecionados para fornecerem um amplo intervalo de bases técnicas e para assegurar que estão representados os vários grupos de trabalho.
2. Um coordenador ou grupo coordenador ALARA. Este coordenador ou grupo verifica se as decisões tomadas pelo Comitê ALARA foram implementadas. É, também, a pessoa de contato designada entre a força de trabalho e a gerência para discutir questões de radioproteção. O grupo de coordenação, geralmente é composto por engenheiros, radioprotecionistas e técnicos e é encarregado de efetuar uma análise detalhada dos trabalhos apropriados para ALARA.

Links Relacionados

- [Considerações sobre o processo de otimização](#)
- [Passos a serem seguidos para um procedimento de otimização](#)

3.6.2. Análise e seleção de opções de trabalho específicas para a redução das doses à radiação ionizante (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

As ações para a redução das doses são avaliadas:

- Com relação à eficácia na redução das doses.
- Com relação aos custos de implementação
- Com relação à exequibilidade da ação, em um dado intervalo de tempo (a curto ou médio prazo).

De acordo com a publicação 21 do OIEA, no caso de que a redução de doses, na execução de uma tarefa, permita que uma categoria de trabalhadores possa executar outros trabalhos, durante o ano, sem alcançarem o limite de dose individual, devem ser considerados os custos

que seriam gerados pela necessidade de treinamento, educação e emprego de outros trabalhadores que deveriam executar estes outros trabalhos.

Para tomada de decisão no processo de otimização da proteção radiológica, devem ser considerados alguns elementos para identificar claramente uma estrutura:

- Os vínculos financeiros (isto é, a existência de um orçamento específico para a redução das doses, um orçamento completo para a instalação).
- Os vínculos técnicos ou de tempo (isto é, o tempo disponível antes de executar o trabalho, comparado com o tempo necessário para implementar ou desenvolver outra opção).
- No estágio de projeto, as restrições de dose individuais.
- Em alguns casos, a necessidade de se considerar uma dose individual fixa, para o trabalho especificado.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, não é importante determinar um valor da dose individual abaixo do qual o processo de otimização deve parar, pois dependendo da situação de exposição, a melhor opção pode estar próxima ou muito inferior à restrição de dose pertinente. Isto significa que o processo de otimização pode resultar em doses menores do que qualquer valor que possa ter sido proposto como um “patamar de entrada” no sistema da proteção radiológica.

3.6.3. Principais indicadores da eficácia do monitoramento de um plano ALARA (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

Recomendações da CIPR

De acordo com a publicação 101 da CIPR, há casos em que as soluções do processo de otimização da proteção radiológica já implementadas podem ser mudadas em função de contextos técnicos, econômicos, legais ou sociais. Podem ser mudadas se houver a introdução de novas tecnologias, o aumento do interesse público ou a disponibilidade de novos recursos para a proteção.

De acordo com esta publicação, a otimização é o resultado do balanço entre o detrimento da exposição (econômico, humano, social, político etc) e os recursos disponíveis para a proteção dos indivíduos.

Monitoramento da eficácia de um plano ALARA de proteção radiológica.

De acordo com a publicação 21 do OIEA, em virtude do conceito ALARA ser aplicado a longo prazo, no monitoramento de um plano ALARA, os principais indicadores globais da eficácia deste monitoramento são as tendências das doses individuais, doses coletivas e a frequência e gravidade dos incidentes e acidentes. Deve-se lembrar que a finalidade da otimização da proteção radiológica é reduzir as doses individuais e a coletiva.

De acordo com o OIEA, além dos principais indicadores globais, a eficácia de um plano ALARA pode ser ulteriormente monitorada, por meio de uma realimentação realizada por indivíduos

ou grupos de indivíduos, por meio de um processo formal ou informal de comunicação. (Exemplos: revisões após o trabalho, sugestões concernentes ao plano ALARA etc.).

Segundo o OIEA, no processo de revisões da eficácia de um plano ALARA, devem ser incluídos:

- Comparações das exposições para trabalhos repetitivos de uma iteração a outra.
- Comparações com os resultados alcançados em instalações similares alhures.

Links Relacionados

- [Revisões planejadas e alimentação do processo](#)
- [Revisões regulares da situação de exposição global](#)

3.6.4. Aplicação da otimização em operações envolvendo radiações ionizantes e em regulamentos (Publicação 101 – CIPR)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, a responsabilidade de implementar a otimização da proteção radiológica cabe à gerência de operação da instalação em todas as situações de exposição, isto é, planejadas, de emergência e existentes e deve se submeter às exigências da autoridade regulatória.

No processo de otimização da proteção radiológica, as diferentes organizações têm deveres com relação à cultura de segurança:

- A gerência operacional que tem o dever de desenvolver uma cultura de segurança ativa que seja o suporte de uma otimização bem sucedida.
- A autoridade regulatória que deve encorajar a gerência operacional para que desenvolva uma cultura de segurança dentro de sua organização, mas também deve existir uma cultura de segurança dentro da própria autoridade.

A autoridade regulatória pode exigir o processo de otimização da proteção radiológica por parte da gerência operacional de uma instalação.

A autoridade competente pode exigir na licença de operação que seja alcançado um patamar de proteção e segurança pré-estabelecido.

Com relação à otimização da proteção radiológica de uma instalação, deve ser exigido que ela seja documentada e completamente entendida por todas as partes, principalmente quando o trabalho é planejado, prescrito, executado e supervisionado por outros que não estão sob o controle direto da gerência operacional.

De acordo com a publicação 101 da CIPR, com a finalidade de assegurar a existência de uma sólida cultura de segurança em todos os níveis gerenciais e de equipe, a gerência operacional de uma instalação deve promover algumas ações:

- Desenvolver e fornecer filosofias internas, prioridades e programas de garantia da qualidade.

- Com relação aos objetivos da gerência operacional que são: evitar acidentes, gerenciar a probabilidade de exposições potenciais e manter as exposições do trabalhador e do público tão pequenas quanto racionalmente exequível considerando fatores econômicos e sociais.

Papel do órgão regulatório no processo de otimização da proteção radiológica de uma gerência operacional de uma instalação:

Ele deve focar os processos, os procedimentos e os julgamentos tomados na otimização bem como fornecer guias para construir um diálogo profundo entre a autoridade e a gerência operacional, pois o sucesso do processo de otimização depende enormemente da qualidade deste diálogo.

Links Relacionados

- [Responsabilidade da decisão final](#)
- [Responsabilidades gerais das autoridades competentes](#)

3.6.5. Valor monetário da dose coletiva unitária: valor alfa (Publicação 101 – CIPR; Série de Relatórios de Segurança 21 – OIEA)

De acordo com a publicação 101 da CIPR, o valor monetário do sievert-pessoa foi introduzido com a finalidade de reduzir a exposição coletiva da distribuição de dose de um grupo especificado da população ou de trabalhadores e ao mesmo tempo, reduzir o espalhamento desta distribuição e suas maiores doses individuais.

Equação que fornece o modelo analítico do valor monetário do sievert-pessoa, de acordo com a CIPR:

$$\alpha_{\text{ref}(d)} = \alpha_{\text{base}} (d/d_0)^a$$

Onde:

$\alpha_{\text{ref}(d)}$ é o valor monetário do sievert-pessoa para o valor da exposição individual d ;

α_{base} É o valor monetário básico do sievert-pessoa;

d_0 é o valor inferior do intervalo de dose individual em que pode ser aplicado o fenômeno de aversão;

d é o valor da exposição individual anual;

a é o coeficiente que apresenta o grau de aversão ($a = 0$ quando $d < d_0$ e $a \geq 0$ quando $d \geq d_0$)

De acordo com a CIPR, na prática para implementar o modelo de determinação do valor monetário do sievert-pessoa em função da dose individual precisamos definir um valor para vários parâmetros: “ α_{base} ”, “ d_0 ” e “ d ”

- O valor α_{base} representa o valor monetário de detrimento à saúde associado a uma unidade de exposição coletiva, isto é, a perda de expectativa de vida associada a um sievert-pessoa. Para sua determinação podem ser usados métodos econômicos incluindo a abordagem do Capital Humano (baseado no Produto Nacional Bruto).

- O valor de “ d_0 ” corresponde ao valor superior da dose individual, abaixo do qual não é considerada a aversão à dispersão da exposição. Seu valor depende do grau de aceitação do risco para a população exposta. Para a exposição laboral parece racional adotar o valor correspondente à principal restrição de dose pertinente para o público em situações normais, isto é, 1mSv.a^{-1} .
- O coeficiente “ a ” representa o grau de aversão à dispersão da exposição individual. Para satisfazer os objetivos deve ser maior do que 1 e para as exposições laborais parece razoável um intervalo de valores entre 1,2 e 1,8.

Para o OIEA o custo da dose evitada por uma opção de proteção radiológica, por Sv-pessoa, para ser considerada solução analítica, deve ser menor ou igual a α e ser aquela mais próxima ao seu valor. Quando o custo implícito do sievert-pessoa evitado, associado a uma opção, é muito menor do que o valor referência monetário do sievert-pessoa, a opção pode ser considerada como razoável, em termos de custo-eficácia. Se o custo implícito é maior do que o valor monetário referência do sievert-pessoa, então, unicamente com base no critério de custo eficácia, a opção é julgada não ser razoável (desde que seu custo seja maior do que aquele que foi concordado gastar, para evitar uma dose coletiva unitária).

Em seu exemplo mostrado no Safety Reports Series nº 21, o OIEA sugere determinar o valor α pela abordagem do capital humano, por meio de um produto no qual participam os valores:

- da perda de expectativa de vida média, associada a um efeito à saúde, induzido pela radiação (cânceres fatais e efeitos hereditários),
- do produto interno bruto doméstico por ano e per capita,
- monetários de um efeito à saúde, induzido pela radiação
- da probabilidade de sua ocorrência para os trabalhadores.

Para determinar um conjunto de valores monetários de um sievert-pessoa, em função das doses individuais, o OIEA sugere na publicação Safety Reports Series nº 21 uma destas duas equações, conforme o caso, ou ambas:

$$\alpha_{\text{ref}}(d) = \alpha_{\text{base}} \text{ para } d < d_0$$

$$\alpha_{\text{ref}}(d) = \alpha_{\text{base}} \times (d/d_0)^a \text{ para } d \geq d_0$$

em que:

α_{base} representa o valor monetário do detrimento à saúde associado à dose coletiva unitária; d_0 corresponde ao valor da dose individual, abaixo da qual a aversão ao valor da dose não é considerado. Este valor depende do grau de aceitação do risco pela população exposta. Por exemplo, no caso das doses laborais, foi adotado o valor correspondente ao limite de dose individual para o público (1 mSv/a). Este valor pode ser adaptado de acordo com a situação específica considerada].

O coeficiente a reflete o grau de aversão ao valor da dose individual. Foi demonstrado que a deve ser maior do que 1, para satisfazer os objetivos. No caso das doses laborais parece ser

razoável um intervalo de valores entre 1,2 e 1,8, com base em uma revisão da literatura sobre aversão ao risco.

Links Relacionados

- [Exemplos de Valores monetários usados para a dose coletiva unitária](#)
- [Formulação geral para a avaliação do valor alfa pela CIPR](#)
- [Principais métodos para o cálculo do custo atribuído ao detrimento da saúde](#)
- [Técnica de ajuda para tomada de decisão: custo-benefício](#)

REFERÊNCIAS

- [1] SORDI, G.M.A.A. **Principais Atividades da Proteção Radiológica**, IPEN-CNEN/SP. São Paulo, 1980
- [2] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Implications of Commission Recommendations That Dosis Be Kept as Low as Readily Achievable**, publicação ICRP 22, Viena, 1973
- [3] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Rio de Janeiro, 2005
- [4] COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL. **Pesquisa Sobre o Uso das Tecnologias da Informação e da Comunicação no Brasil 2008**, Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR, São Paulo: 2009
- [5] COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL. **Pesquisa Sobre o Uso das Tecnologias da Informação e da Comunicação no Brasil 2009**, <http://www.cetic.br/tic/2009/index.htm>, acessado em 8 de junho de 2012
- [6] COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL. **Pesquisa sobre o uso das tecnologias da informação e da comunicação no Brasil : TIC Provedores 2011 : Survey on the use of information and communication technologies in Brazil : ICT Providers 2011**, <http://www.cetic.br/tic/provedores/2010/index.htm>, acessado em 8 de junho de 2012
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety Series n. 102: Recommendation for the Safe Use and Regulation of the Radiation Source in Industry, Medicine and Teaching**. Viena, 1990
- [8] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 3.02: Serviços de Radioproteção**. Rio de Janeiro, 1988
- [9] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Resolução 111/11: Certificação da Qualificação de Supervisores**. Rio de Janeiro, 2011
- [10] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 3.05: Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Medicina Nuclear**. Rio de Janeiro, 1996
- [11] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 3.06: Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Radioterapia**. Rio de Janeiro, 1990
- [12] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 4.01: Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais**. Rio de Janeiro, 2005
- [13] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 5.01: Transporte de Materiais Radiativos**. Rio de Janeiro, 1988
- [14] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 5.02: Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Elementos Combustíveis de Usinas Nucleoelétricas**. Rio de Janeiro, 2003
- [15] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 5.03: Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Itens de Usinas Nucleoelétricas**. Rio de Janeiro, 1989
- [16] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 6.01: Requisitos para o Registro de Pessoas Físicas para o Preparo, Uso e Manuseio Fontes Radiativas**. Rio de Janeiro, 1998
- [17] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Resolução 112/11: Licenciamento de Instalações Radiativas**. Rio de Janeiro, 2011

- [18] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 6.04: Funcionamento de Serviços de Radiografia Industrial**. Rio de Janeiro, 1989
- [19] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 6.05: Gerência de Rejeitos Radiativos em Instalações Radiativas**. Rio de Janeiro, 1985
- [20] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NE 6.06: Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radiativos**. Rio de Janeiro, 1989
- [21] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 6.09: Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radiativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. Rio de Janeiro, 2002
- [22] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection**, publicação ICRP 37. Viena, 1983
- [23] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and Decision-Making in Radiological Protection**, publicação ICRP 55, Ann. ICRP 20 (1). Viena, 1990
- [24] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **The optimization of the Radiological Protection: Broadening the Process**, publicação ICRP 101b, Ann. ICRP 36 (3). Viena, 2006
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety Report Series n. 21: The optimization of the Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure**. Viena, 2002
- [26] World Wide Web Consortium, <http://www.w3.org/> - acesso em 6 de junho de 2012
- [27] Improving MySQL Query Analyser – Performance Optimization, <http://www.mysql.com/> - acesso em 6 de junho de 2012
- [28] Sqlserver, Net Solutions, <http://www.sqlserver.com/> - acesso em 6 de junho de 2012
- [29] Php, <http://www.php.net/> - acesso em 6 de junho de 2012
- [30] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation**, publicação ICRP 74, Ann. ICRP 26 (3-4). Viena, 1996
- [31] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework**, publicação ICRP 64. Viena, 1993
- [32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety Series No. 115: International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources**. Vienna, 1996.
- [33] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES RADIATION PROTECTION, **ALARA – From Theory Towards Practice**, Report EUR 13796 EN, ISSN 1018-5593. Luxemburg, 1991
- [34] SORDI, G. A. A. ; SOUSA, J. J. ; MARTUCI, T. **The Alpha Value Decrease With the Decrease of Individual Annual Effective Dose**. In: 12Th International Congress of the International Radiation Protection Association, 2008, Buenos Aires
- [35] PEREZ, C. F. A. ; SORDI,G.A.A . **Sensitivity Analysis: The Linearity Argument Between The Different Radiological Protection Options**. In: The Second European International Radiation Protection Association IRPA, 2006, Paris

- [36] PEREZ, C. F. A. ; SORDI, G.A.A . **Change in the Alpha Criterion Policy: Variable based on the Maximum Individual Dose Function**. In: The Second European International Radiation Protection Association (IRPA), 2006, Paris
- [37] PEREZ, C. F. A., SORDI, G.A.A. **How we can Transform the Constant Alpha Value in a Variable Function** In: First American IRPA Congress, 2006, Acapulco
- [38] ALBUQUERQUE, S. M.; LEVY, D. S.; SORDI, G. M. A. A.; LEVY, P. J. **Informatization of Multi-Criteria Analysis Outranking: A Software to Improve Decision-Making in Radiological Protection Optimization Programs**. In: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 2012, Glasgow
- [39] LEVY, D. S. ; SORDI, G.M.A.A. **Informatization and integration of radiological protection optimization programs**. In: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 2012, Glasgow
- [40] LEVY, D. S., SORDI, G.M.A.A. **Tecnología informática y radioprotección: informatización de la optimización y investigación del perfil de utilización**. In: Simposio Internacional de Protección Radiológica - Encuentro Iberoamericano de Protección Radiológica, 2012, Cusco
- [41] SAHYUN, A., LEVY, D.S., SORDI, G.M.A.A., LEVY, P.J., GHOBIL, C.N., PEREZ, C.F.A., SANCHES, M.P. **Nuevas perspectivas para entrenamiento en el transporte de materiales radioactivos usando tecnología multimedia**. In: Simposio Internacional de Protección Radiológica - Encuentro Iberoamericano de Protección Radiológica, 2012, Cusco
- [42] GIRONZINI, E.M. **Contribución de las redes sociales para el desarrollo de La protección radiológica**. In: Simposio Internacional de Protección Radiológica - Encuentro Iberoamericano de Protección Radiológica, 2012, Cusco
- [43] LEFAURE, C., BALDUYCK, S., BARBEY, P., BARRET, C., BARREY, N., BENQUE, B., FIGUEIRA, M., MOZZICONACCI, J.G., SEGUIN, B., TOURNEUX, C. **A bottom up experience: the French RPO and qualified experts regional networks**. In: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 2012, Glasgow
- [44] GIRONZINI, E.M. **Social Networking and Radiation Protection**. In: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 2012, Glasgow
- [45] EVANS, S., DENMAN, A.R., GOLDSTONE, K., EVE, J. **E-IRMER - An e-Learning package for Radiation Protection training of Health Staff**. In: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 2012, Glasgow
- [46] HEATON, B., ZABIEREK, G., MOSELEY, T. **Distance learning course in radiation protection**. In: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 2012, Glasgow
- [47] REPROLAM - RED DE OPTIMIZACIÓN DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA OCUPACIONAL EN LATINO AMÉRICA, <http://reprolam.ird.gov.br> – acesso em 26 de agosto de 2012