AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO DOS RISCOS APRESENTADOS PELOS RADIOISÓTOPOS APÓS
SEREM SUBMETIDOS AOS EFEITOS DA DETONAÇÃO DE UM ARTEFATO
EXPLOSIVO**

ADRIANO GIOVANINNI

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

Orientador:

Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi

**São Paulo
2012**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

ESTUDO DOS RISCOS APRESENTADOS PELOS RADIOISÓTOPOS APÓS SEREM SUBMETIDOS AOS EFEITOS DA DETONAÇÃO DE UM ARTEFATO EXPLOSIVO

Adriano Giovaninni

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

Orientador:

Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi

**São Paulo
2012**

Este trabalho é dedicado:

A minha amada família - Heloísa, Ingrid e Giovanna: meu suporte, meu auxílio, meu porto seguro.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que plantou em mim este sonho materializado.

Aos meus pais que foram as ferramentas para concretizar o valioso dom recebido do universo: a vida.

A minha amada esposa Heloísa, pelo carinho, dedicação, paciência e incentivo.

As minhas pequenas pérolas: Ingrid e Giovanna por me darem energia a continuar lutando.

Ao Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi por estar sempre de prontidão orientando-me nas necessidades apresentadas nesta jornada.

À Dra. Linda V.E. Caldas e ao Dr Demerval Leônidas Rodrigues pela ajuda e incentivo durante o curso.

Aos Dr. Fernando da Costa Ferreira Novo, Dr. Adriano Rogério Navarro Dias e à Dra Janete Cristina Gonçalves Gaburo Carneiro pela presteza demonstradas na conclusão deste trabalho.

Ao Tenente Paulo Augusto Aguilar por sempre incentivar-me a trilhar a área acadêmica.

A todos os professores do IPEN que dedicaram seu tempo e sua sabedoria para que minha formação acadêmica fosse um ensinamento de vida.

Finalmente, a todos que fizeram parte desta jornada, os meus mais sinceros agradecimentos, que Deus os ilumine.

ESTUDO DOS RISCOS APRESENTADOS PELOS RADIOISÓTOPOS APÓS SEREM SUBMETIDOS AOS EFEITOS DA DETONAÇÃO DE UM ARTEFATO EXPLOSIVO

Adriano Giovaninni

RESUMO

O presente trabalho tratou do estudo dos riscos apresentados pelos radioisótopos após serem submetidos aos efeitos da detonação de um artefato explosivo. O estudo permitiu a obtenção de dados baseados em pesquisas bibliográficas, documentais, cálculos e *softwares*, possibilitando análises das consequências resultantes de artefatos explosivos contendo radioisótopos. O objetivo deste trabalho foi a obtenção de conhecimentos quanto à potencialidade destrutiva do explosivo denominado emulsão, composto principalmente por nitrato de amônia, bem como das propriedades do cobalto, iodo e do irídio que farão parte da carga destes explosivos. Supomos que à emulsão fossem acrescentadas as atividades de $1,5 \cdot 10^2$ TBq de cobalto-60, $3,7 \cdot 10^{-3}$ TBq de iodo-131 e 3,7 TBq de irídio-192 que são suas atividades representativas em radioterapia, medicina nuclear e gamagrafia respectivamente. Avaliamos a progressão da pluma radioativa a partir do epicentro da explosão, possibilitando análises dos valores das doses, da distribuição e do alcance, a partir do epicentro, dos radioisótopos estudados. A simulação da progressão da pluma radioativa foi realizada por cálculos e simulação computacional fazendo uso dos programas *Blast/FX Explosive Effects Analysis Software* e *The HotSpot Health Physics Codes - Version 2.07.2*.

No trabalho só foram estudadas as doses resultantes da exposição externa considerando que todo material radioativo volatizou. Foi deixado para estudos futuros calcular as doses internas e no pulmão bem como as doses resultantes de estilhaços radioativos produzidos na explosão.

STUDY OF RISKS PRESENTED BY RADIOISOTOPES BE SUBMITTED AFTER THE EFFECTS OF DETONATION AN EXPLOSIVE DEVICE

Adriano Giovaninni

ABSTRACT

This job devotes to the study of the radioisotopes risks, after the effects of an explosion of an explosive device. This study developes data based on bibliographies, documents, calculation and also software, and as a result, could provide analysis of an explosive device blast with radioisotopes. The purpose of this work is to provide knowlegde about the potencial destructive result of a blast of an explosive called emulsion, made with ammonia nitrate, and also with cobalt properties, iodine and iridium of a explosive charge. To this emulsion were added activities of $1,5 \cdot 10^2$ TBq of Cobalt-60, $3,7 \cdot 10^{-3}$ TBq of iodine-131 and 3,7 TBq of iridium-192. Such activities are seen in radioterapy, nuclear medicine and gamagraphy. It could consider the radioactive plume progress from the blast epicenter, in order to analyse the value of the dose, the distribution and the distance from the epicenter of the radioisotope studied. The simulation of the radioactive plume progress was made with calculation and computer software, such as Blast/FX Explosive effects analysis software and "The Hotspot health physics Codes – version 2.07.2. In this study was only possible to check the doses from the external effects, to consider the fact that all radioactive material result in volatization. It's important to say that we left for future studies the calculation of the internal doses and inside the lung, and also the doses of the radioactive shrapnel from the blast.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Exposição das circunstâncias atuais	13
1.2 Finalidade	15
1.3 Justificativa	15
1.4 Objetivos do presente trabalho	16
2. CONHECIMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.	18
2.1 Explosivos.....	18
2.2 Bombas.....	19
2.3 Explosão.....	22
2.4 A Radiação Ionizante	29
2.4.1 Grandezas físicas de proteção radiológica	34
2.4.2 Interação da Radiação Ionizante com a Matéria	37
2.4.2.1 Efeito Fotoelétrico	37
2.4.2.2 Efeito Compton.....	38
2.4.2.3 Formação de Pares	38
2.4.3 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante	40

3. PREÂMBULO AO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	46
3.1. Considerações sobre as propriedades de alguns radioisótopos	46
3.1.1 O Cobalto	46
3.1.2 O Iodo	48
3.1.3 O Irídio	49
3.2 Bombas de dispersão de radiação ionizante.....	50
3.2.1 Aspectos comuns entre a explosão e a radiação.....	52
3.2.2 Considerações sobre a explosão.....	55
3.2.3 Testes de campo: Explosões Controladas.....	56
4. DISTRIBUIÇÃO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO IONIZANTE	65
4.1 Dispersão dos radionuclídeos pela explosão	67
4.2 Cálculos da dose efetiva.....	79
5. CONCLUSÃO	85
6. TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de pólvoras para munições	18
Figura 2 – Explosivo nitrato de amônia	19
Figura 3 - Explosivo nitrato de amônia, base emulsão	19
Figura 4 - Granada de mão denominada V40, de origem holandesa	20
Figura 5 – Foguete improvisado apreendido com transgressores da lei	21
Figura 6 - Bomba explosiva improvisada fabricada com pólvora e pregos	21
Figura 7 – Efeito incendiário da explosão	22
Figura 8 – Figuração de onda positiva e onda negativa	23
Figura 9 – Representação do Efeito Fotoelétrico	37
Figura 10 – Representação do Efeito Compton	38
Figura 11 – Representação do Efeito de produção de pares	39
Figura 12 - Processos de interação dos fótons com a matéria	40
Figura 13 Cobalto [25]	47
Figura 14 - Fonte de ^{60}Co transportada ao Hospital das Clínicas em 2010 [26]	47
Figura 15 - Cristal de iodo [29]	49
Figura 16 – Irídio [31]	50
Figura 17 – Tela de configuração da massa explosiva	59
Figura 18 - Tela de configuração da fragmentação	60
Figura 19 – Tela de visualização de danos físicos e em pessoas	61

Figura 20 – Dados sobre fragmentos e danos à 29,6 cm da explosão	62
Figura 21 – Tela demonstrando a distância sem fragmentos	63
Figura 22 - Relação de Fragmentos com a distância	64
Figura 23 – Relação da possibilidade de danos com a distância	64
Figura 24 – Tela principal do programa <i>Hot Spot</i>	68
Figura 25 – Tela das informações para o ^{60}Co	68
Figura 26 – Tela de condições meteorológicas	69
Figura 27 – Contaminação para o ^{60}Co com a carga explosiva de 82,5g	70
Figura 28 - Contaminação para o ^{60}Co com a carga explosiva de 123,8g	71
Figura 29 - Contaminação para o ^{60}Co com a carga explosiva de 244,5g	72
Figura 30 - Tela das informações para o ^{131}I	73
Figura 31 - Contaminação para o ^{131}I com a carga explosiva de 82,5g	74
Figura 32 – Contaminação para o ^{131}I com a carga explosiva de 123,8g	75
Figura 33 - Contaminação para o ^{131}I com a carga explosiva de 244,5 g	76
Figura 34 - Tela das informações para o ^{192}Ir	77
Figura 35 - Contaminação para o ^{192}Ir com a carga explosiva de 118g	77
Figura 36 - Contaminação para o ^{192}Ir com a carga explosiva de 123,8g	78
Figura 37 - Contaminação para o ^{192}Ir com a carga explosiva de 244,5g	79
Figura 38 - Definição das áreas sob os efeitos da radiação e explosão	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pressão e o valor equivalente do fator K	24
Tabela 3 - Efeitos de longa duração da pressão no corpo humano	25
Tabela 2 - Fatores K relacionados à pressão e distância	25
Tabela 4 - Efeitos de longa duração da pressão no corpo humano	26
Tabela 5 – Distância de segurança	28
Tabela 6 – Fragmentação de bombas	29
Tabela 7 – Limites de doses	43
Tabela 8 – Propriedades físicas e químicas do cobalto [27]	48
Tabela 9 – Informações de segurança de produto químico	57
Tabela 10 - Definição da área e efeitos predominantes de uma bomba suja	84

1. INTRODUÇÃO

1.1 Exposição das circunstâncias atuais

A ocorrência de eventos terroristas, como os ataques de 11 de setembro de 2001 contra os Estados Unidos [1]; explosões de trens em Madri, em 11 de março de 2004 [2], e explosões na Inglaterra, em 07 de julho de 2005 [3], dentre muitos outros são exemplos de como locais de grande concentração populacional poderão ser usados para fins terroristas. O bom gerenciamento de crises desta magnitude no âmbito governamental é de grande importância para evitar o descrédito das autoridades constituídas na área de segurança pública ou diretamente relacionadas.

Em nossa realidade temos fatos em que os criminosos demonstraram ter condições para fabricar artefatos explosivos a partir de uma vasta gama de objetos, desde telefones celulares a simples campainhas além de substâncias explosivas de emprego militar ou comercial bem como substâncias improvisadas tendo como base fertilizante e óleo.

No Brasil já conhecemos bem esse passado que para muitos parece esquecido. O grande temor é que o crime organizado no país sofra uma nova metamorfose ainda mais sofisticada e violenta, como ocorrido com a “Falange Vermelha” que nasceu da convivência entre criminosos comuns e ativistas políticos dentro do presídio da Ilha Grande, entre os anos de 1969 a 1978.

Esses princípios fizeram surgir um novo segmento de atividade criminal, o "crime organizado", que teve como sua primeira facção criminosa a "Falange Vermelha", precursora das modernas organizações criminosas brasileiras da atualidade, como o Comando Vermelho (CV), o Terceiro Comando (TC), o Comando Vermelho Jovem (CVJ), no Rio de Janeiro e o Primeiro Comando da Capital (PCC) e suas dissidências em São Paulo.

A globalização e o intercâmbio deixam claras a real possibilidade da migração dos *modus operandi* dos terroristas atuais para o crime organizado. Para termos uma dimensão do problema, Marcos Willians Herbas Camacho, o Marcola, líder da facção Primeiro Comando da Capital, durante entrevista para o jornal O GLOBO [4] comenta: “Estou lendo o Clausewitz, “Sobre a guerra”. Não há

perspectiva de êxito... Nós somos formigas devoradoras, escondidas nas brechas... A gente já tem até foguete antitanques... Se bobear, vão rolar uns Stingers aí...Pra acabar com a gente, só jogando bomba atômica nas favelas... Aliás, a gente acaba arranjando também "umazinha", daquelas bombas sujas mesmo.... Já pensou? Ipanema radioativa?". Outro exemplo foi a intervenção realizada pela Polícia Federal em julho de 2004 [5], onde apreendeu no interior do Amapá, na caçamba de um caminhonete, 18 sacas de um mineral granulado escuro muito mais pesado do que aparentava ser. O material foi examinado nos laboratórios da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)¹, era um composto de urânio. Aqui estava o início para a descoberta de uma das mais obscuras máfias em atuação no País, com braços internacionais e especializados na extração clandestina e na comercialização ilegal de urânio.

A primeira resposta a acidentes com explosivos constitui tarefa da 2ª Cia GATE (Grupo de Ações Táticas Especiais), pertencente ao 4º Batalhão de Polícia de Choque da Polícia Militar do Estado de São Paulo, tropa essa de intervenção frente a situações violentas que requeiram elevada precisão e coordenação das ações policiais.

O principal objetivo do GATE em cenários de crises com explosivos e bombas é estabelecer segurança por meio de ações que façam controlar ou cessar quaisquer atividades violentas sejam terroristas ou criminosas, permitindo que bombeiros, equipes médicas e outros órgãos possam desempenhar suas funções sob condições de segurança.

A utilização de explosivos em conjunto com agentes químicos, biológicos, radiológicos e nucleares tem despertado, em muito, a atenção de grupos terroristas.

Neste ponto, urge refletir como deve ser gerenciado o acréscimo de ações violentas perpetradas com emprego de radioisótopos.

A intervenção em bombas sujas requer um trabalho em conjunto de pelo menos dois órgãos do governo: a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o GATE.

¹ A Comissão Nacional de Energia Nuclear é uma autarquia federal criada em 10 de outubro de 1956 e vinculada ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Como órgão superior de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização, estabelece normas e regulamentos em radioproteção e licencia, fiscaliza e controla a atividade nuclear no Brasil. Desenvolve ainda pesquisas na utilização de técnicas nucleares em benefício da sociedade.

Devemos considerar um fator importantíssimo, o que ocorrerá com as propriedades do radioisótopo, na exposição das pessoas, quando submetido às altas pressão e temperatura geradas pela explosão?

Em 2009 o Esquadrão de Bombas do GATE atuou em 117 ocorrências com artefatos explosivos, em 2010 atuou em 187 casos, em 2011 foram 264 intervenções, e até julho de 2012 foram 150 ocorrências². Verifica-se que há uma demanda significativa de atendimentos causando a necessidade de um intensivo preparo dos especialistas em explosivos, bem como da aquisição de equipamentos para atuação.

As atividades de atendimento a ocorrências envolvendo explosivos pelo GATE e aqueles envolvendo materiais radioativos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear, são reconhecidos de fato pelo Estado nos restando a criação efetiva de um protocolo de atendimento em conjunto, a fim de se ter comando único e integrado.

A radiação ionizante é amplamente utilizada para fins pacíficos como na medicina diagnóstica e terapêutica, indústria, agricultura, geração de energia, meio ambiente; contudo, em razão do seu vasto uso, torna-se um atrativo, por transgressores da lei, pelo possível.

Apesar dos radiofármacos possuírem meia-vida curta, e, portanto os efeitos da radiação ionizante em pouco tempo deixariam de ser preocupação, o temor psicológico causado na população pelo desconhecimento do material perpetuaria por muito mais tempo.

1.2 Finalidade

A finalidade deste trabalho foi analisar as consequências resultantes de artefatos explosivos contendo radioisótopos.

1.3 Justificativa

² Fonte: Seção de Perícias em Explosivos do Grupo de Ações Táticas Especiais.

A justificativa inicia-se no art. 37, da Constituição Federal da República Federativa do Brasil – 1988, estabelecendo que a administração pública direta e indireta de qualquer dos Poderes da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios deverá obedecer aos princípios de legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade e **eficiência**.

A eficiência, hoje princípio da Administração, é de observância obrigatória pelos administradores públicos.

Na área do conhecimento de segurança com explosivos, podemos dividir didaticamente as bombas em: industrializadas e improvisadas (caseiras). Estas causam uma maior preocupação, por não possuírem um projeto industrial metódico como aquelas, principalmente, as conhecidas como bombas de dispersão de radiação, ou "bombas sujas".

Estas bombas são construídas tendo como carga um explosivo qualquer mesclado a um radionuclídeo. A mescla de componentes possui como objetivos causar danos físicos ou estruturais em decorrência da pressão causada pelo efeito da detonação da massa explosiva, bem como o de provocar a pulverização e o espalhamento do material radioativo ao redor do meio ambiente compreendido em seu epicentro.

A **hipótese** levantada foi a de que existe desconhecimento do potencial destrutivo de bombas sujas pelas autoridades e pela população, bem como inexistência de discussão e competências sobre o tema apesar de fazer parte dos assuntos de segurança pública e defesa civil.

O **método** empregado foi o hipotético-dedutivo, a pesquisa permitiu a obtenção de dados baseados em pesquisas bibliográficas e documentais, incluindo artigos veiculados por sítios da internet. Por fim, a técnica da pesquisa foi a análise de conteúdo.

1.4 Objetivos do presente trabalho

Os objetivos deste trabalho são:

- Obter conhecimentos quanto à potencialidade destrutiva do explosivo denominado emulsão à base de nitrato de amônia;
- Estudar as propriedades do cobalto, iodo e irídio que farão parte da carga dos explosivos;

- Avaliar os valores de contaminação e de doses de radiação no ar e na superfície bem como a sua distribuição a partir do epicentro da explosão;
- Discutir o perigo apresentado pelas radiações emitidas pelos radioisótopos estudados em função dos valores das doses e contaminações e de seus alcances no espaço a partir do epicentro.

2. CONHECIMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.

2.1 Explosivos

O explosivo é conceituado como sendo um composto ou uma substância capaz de se transformar, por meio de reações químicas de óxido-redução, em produtos gasosos e condensados, produzindo altas temperaturas e pressões. [6]

Uma característica importante do explosivo, ao dar início à reação química, é a produção de calor e pressão elevados em razão da energia desprendida.

A velocidade da reação química depende do tipo do explosivo, da sua densidade e de outras características observadas para qual fim será o explosivo, havendo desta forma a classificação quanto à velocidade de detonação, sendo os baixos explosivos aqueles com velocidade abaixo de 2.000 m/s e características de explosivos propulsores, mostrado na Figura 1; e os altos explosivos, com velocidade acima de 2.000 m/s e características de explosivos rompedores; como exemplos, têm-se os materiais das Figuras 2 e 3.

Figura 1 – Exemplos de pólvoras para munições
Fonte: CBC (Companhia Brasileira de Cartuchos).

Figura 2 – Explosivo nitrato de amônia
Fonte: Empresas Britanite.

Figura 3 - Explosivo nitrato de amônia, base emulsão
Fonte: Empresas Britanite.

2.2 Bombas

No item 2.1 foi fornecida a definição do explosivo, que ao se analisar de uma forma simplista nada mais é do que uma substância química.

Contudo, quando há a necessidade de empregar a substância integrada a um dispositivo para funções específicas, utiliza-se o termo bomba, que representa

todos os dispositivos ou artefatos confeccionados para causar danos, lesões ou mortes, de forma voluntária ou não [6].

Uma importante consideração deve ser dada ao tipo da carga que compõe a bomba, uma vez que nem toda bomba explode. Há as bombas não explosivas que são artefatos que contêm produtos tóxicos, ácidos e corrosivos, agentes químicos, bacteriológicos ou radioativos. As bombas explosivas contêm produtos explosivos e têm como resultado de seu acionamento a explosão [6].

Ainda há as bombas incendiárias, pois contêm produtos inflamáveis e têm como resultado de seu acionamento o fogo; e as bombas explosivas - incendiárias, que nada mais são que a combinação dos elementos anteriores [6].

Quanto a forma de construção podem ser classificadas em EOD - *Explosive Ordinance Disposal* (explosivos industrializados e comercializados) que são todas as bombas confeccionadas regularmente, como foguetes, mísseis, granadas, petardos e acessórios de acionamento militares, conforme Figura 4, e os IED - *Improvised Explosive Device* (artefatos explosivos improvisados) que são as bombas caseiras ou improvisadas, com fins criminosos; ilustrados nas Figuras 5 e 6.

Figura 4 - Granada de mão denominada V40, de origem holandesa.

Fonte: Polícia Militar do Estado de São Paulo.

Figura 5 – Foguete improvisado apreendido com transgressores da lei.

Fonte: Polícia Militar do Estado de São Paulo.

Figura 6 - Bomba explosiva improvisada fabricada com pólvora e pregos.

Fonte: Polícia Militar do Estado de São Paulo..

Baseado nesta classificação uma bomba de dispersão de radiação ionizante, ou bomba suja, estaria classificada como um artefato improvisado, pois não segue uma linha de fabricação regular, nem tampouco possui descritivo industrial conforme normas técnicas legais para sua fabricação.

2.3 Explosão

Explosão é toda expansão violenta, provocada pela decomposição da matéria explosiva [6]. Durante a explosão, nas proximidades do epicentro há predominantemente a relevância das ações da onda de choque e da alta temperatura. Obviamente que esta região, assim como as demais, está relacionada diretamente à quantidade da massa explosiva, ou seja, quanto maior a quantidade de explosivo, maior o alcance dos efeitos da explosão, o contrário também prevalece.

Outro fator relacionado diretamente aos efeitos da explosão é a velocidade de reação da substância explosiva, ou seja, no caso de explosivos com tempo de reação mais veloz, a ação dos efeitos acaba sendo mais rápida enquanto os que possuem velocidades de reação mais longas, a ação dos efeitos permanece atuante por um período de tempo maior. A foto da Figura 7 demonstra uma explosão como resultado da reação química.

Figura 7 – Efeito incendiário da explosão .
Fonte: Polícia Militar do Estado de São Paulo.

As velocidades mencionadas referem-se à ordem de 6900 m/s no caso do TNT e de 2700 m/s para nitrato de amônia [7]. Ambas possuem velocidades elevadas, contudo efeitos diferentes, em razão dos diferentes tempos de reação.

Um efeito de relevância é a onda positiva que é a expansão polidirecional dos gases, formando em seu interior vácuo, e na sequência a onda negativa que

seria o preenchimento do vácuo formado pela onda positiva, quando sua força de expansão for menor que a pressão atmosférica, conforme Figura 8.

Figura 8 – Figuração de onda positiva e onda negativa.
Fonte: Polícia Militar do Estado de São Paulo.

Os efeitos da explosão podem ser obtidos a partir dos cálculos a seguir, os quais são aplicados para locais abertos, fornecendo distâncias de segurança [8], e também as Tabelas 1, 2, 3 e 4 [8].

$$d = K\sqrt[3]{W}$$

sendo:

d= distância (em pés) para um determinado valor de p.s.i.³, também definida como distância de segurança ou distância de fragmentação;

K= Valor numérico relacionado a uma determinada pressão em p.s.i.;

W= massa total de explosivo, com sua equivalência em TNT (Trinitrotolueno).

³ Psi (*pound force per square inch*), ou libra força por polegada quadrada, é a resultante de uma força de uma libra-força aplicada a uma área de uma polegada quadrada.

Tabela 1 - Pressão e o valor equivalente do fator K
Fonte: O'CONNOR [8]

Pressão da Explosão (p.s.i)	Pressão da Explosão (Pa⁴)	Fator "K"
0,07	482,6	300
0,10	689,5	250
0,50	3447,4	75
1,0	6894,7	45
2,0	13789,5	30
3,0	20684,3	20
4,0	27579	18
5,0	34473,8	15
6,0	41368,5	14
7,0	48263,3	13
8,0	55158	12
9,0	62052,6	11
10,0	68947,6	10
15,0	103421,3	8
20,0	137895,1	7
30,0	206842,7	6
40,0	275790,3	5
60,0	413685,4	4
100,0	689475,7	3.5
200,0	1378951,4	3

⁴ A unidade de pressão no sistema internacional (SI) é o N/m² (Newton por metro quadrado), que também pode ser chamada de pascal, cujo símbolo é Pa

Tabela 2 - Fatores K relacionados à pressão e distância
Fonte: O'CONNOR [8]

Fator "K"	Pressão da explosão Psi	Pressão da explosão Pa	DISTÂNCIA
18	4	27579	Distância mínima de segurança para operacionais equipados.
300	0,07	482,6	Distância segura contra projéteis leves.
500	Pressão atmosférica	Pressão atmosférica	Distância segura contra projéteis pesados.

Tabela 3 - Efeitos de longa duração da pressão no corpo humano
Fonte: O'CONNOR [8]

Efeitos de longa duração da pressão em pessoas (10 milisegundos)	
Pico de pressão (psi)	Efeitos
5	Limiar de dano do tímpano
15 - 20	50% de possibilidade de lesionar o tímpano para pessoas acima de 20 anos
30 - 35	50% de possibilidade de lesionar o tímpano para pessoas com menos de 20 anos
08 - 15	Limiar de danos nos pulmões
20 - 30	Graves danos nos pulmões
30 - 50	Limiar de letalidade
50 - 75	50% de possibilidade de morte
Acima de 75	Morte

Tabela 4 - Efeitos de longa duração da pressão no corpo humano

Fonte: O'CONNOR [8]

Efeitos de curta duração da pressão em pessoas desprotegidas (1 milissegundo)	
Pressão (psi)	Efeitos
5	Limiar de dano do tímpano
15	50% de possibilidade de lesionar o tímpano
30 - 40	Alguma possibilidade de lesionar os pulmões
80	50% de possibilidade de provocar graves danos nos pulmões
100	Alguma possibilidade de morte
130 - 180	50% de possibilidade de morte
200 - 250	Quase 100% de possibilidade de morte

Os cálculos foram realizados no Sistema Britânico para se adequarem às fórmulas e tabelas; ao final foram convertidos ao Sistema Internacional.

Supondo uma carga explosiva com 7 libras de TNT, e estabelecendo o fator $K=300$ para a distância de segurança com a pressão de 0,07 psi, que em nada afetaria o corpo humano, o cálculo da distância de segurança para os efeitos da pressão e para segurança contra projéteis leves seria:

$$d = K\sqrt[3]{W}$$

$$W = 7 \text{ lbs}$$

$$d = 300 \times \sqrt[3]{7}$$

$$d = 300 \times 1,91$$

$$d = 573,88 \text{ ft ou } 174,92 \text{ m}$$

A distância mínima para a implantação de um centro de comando e controle seria na ordem de 175 metros, ou seja, o local estaria protegido contra pressão e fragmentos leves, contudo poderia ainda sofrer danos por fragmentos pesados,

assim suplementando a segurança, e estabelecendo o fator $K=500$ para a distância de segurança com a presença da pressão atmosférica e para segurança contra projéteis pesados seria:

$$d = K\sqrt[3]{W}$$

$$W = 7 \text{ lbs}$$

$$d = 500 \times \sqrt[3]{7}$$

$$d = 500 \times 1.91$$

$$d = 956,46 \text{ ft ou } 291,53 \text{ m}$$

A distância ideal para a implantação de um centro de comando e controle seria na ordem de 291 metros; estariam seguros quanto a fragmentos leves e pesados. Posteriormente no capítulo que trata sobre efeitos biológicos da radiação ionizante, outro fator estará influenciando nesta distância, como limites de taxas de doses.

Apesar de ser uma forma útil e rápida de trabalho, principalmente em ocorrências reais, cujo fator tempo de resolução muitas vezes impera, estes cálculos fornecem parâmetros que devem ser comparados com outras doutrinas e não podem ser considerados como exatos e únicos.

Desta maneira, para aumentar o nível de segurança, há uma outra fonte de comparação como demonstrados nas Tabelas 5 e 6 desenvolvidas pela *International Association of Bomb Technicians and Investigators - IABT⁵* (Associação Internacional dos Investigadores e Técnicos em Bombas) e que podem complementar a determinação de áreas de segurança.

⁵ Associação Internacional dos Investigadores e Técnicos em Bombas é uma organização independente, sem fins lucrativos, formado por profissionais para combater o uso criminoso de explosivos, realizado por meio do intercâmbio de conhecimentos, formação e informação entre o pessoal empregado nas áreas de aplicação da lei, fogo e serviços de emergência, a ciência militar, forense e outras áreas afins.

Tabela 5 – Distância de segurança
www.iabti.org

Explosivos (lb)	Explosivos (kg)	Distância de segurança. (ft)	Distância de segurança. (m)
1 – 27	0,453 – 12,25	900	274,3
28	12,7	910	277,4
30	13,6	930	283,5
32	14,5	951	289,9
34	15,4	965	294,1
40	18,1	1020	310,9
42	19	1030	314
44	19,9	1050	320
46	20,9	1065	324,6
48	21,8	1080	329,2
50	22,7	1104	336,5
55	24,9	1141	347,7
60	27,2	1170	356,6
65	29,5	1200	365,7
70	31,7	1225	373,4
75	34	1260	384
80	36,3	1290	368,5
85	38,5	1310	399,3
100	45,3	1400	426,7
125	56,7	1500	457,2
300	136,1	2000	609,6
400	181,4	2200	670,6
500	226,8	2400	731,5

Tabela 6 – Fragmentação de bombas
Tabela de danos
www.iabti.org

Massa da bomba explosiva.		Raio de demolição.		Danos irreparáveis.		Danos reparáveis.		Pequenos danos.		Distância mínima de segurança.	
lb	kg	ft	m	ft	m	ft	m	ft	m	ft	m
1–10	0,4–4,5	3–5	0,9-1,5	5–9	1,5-2,7	20	6,1	100	30,5	900	274,3
10–25	4,5–11,3	6–10	1,8-3	10–15	3-4,6	30	9,1	150	45,7	1740	530,3
50	22,7	12	3,6	23	7	50	15,2	340	103,6	2140	652,3
150	68	20	6	50	15,2	100	30,5	650	198,1	3180	969,3
250	113,4	30	9,1	60	18,2	120	36,6	800	243,8	3720	1133,8
500	226,8	45	13,7	95	29	190	58	1120	341,7	3800	1158,2
1000	453,6	75	22,9	150	45,7	300	91,4	1600	487,7	3800	1158,2

A quantidade de 7 lb no exemplo de cálculo acima daria uma distância de 900 ft. ou 274,32 m, valor próximo de 291,53 m calculados anteriormente, obtendo uma segurança maior na classificação de perímetros.

2.4 A Radiação Ionizante

O universo científico do conhecimento da radiação ionizante inicia-se sobre a estrutura da matéria que vem recebendo atenção de filósofos e cientistas desde os primórdios da civilização. Sob o ponto de vista de proteção radiológica, a matéria pode ser considerada como constituída de partículas fundamentais cujas propriedades de interesse são a massa e a carga elétrica. Neste contexto, as três partículas importantes para a compreensão da estrutura e propriedades da matéria são os elétrons (e), os prótons (p) e os nêutrons (n). A estas pode ser acrescentado o fóton associado à radiação eletromagnética [9].

As radiações são produzidas por processos de ajustes que ocorrem no núcleo ou nas camadas eletrônicas, ou pela interação de outras radiações ou partículas com o núcleo ou com o átomo. [10]

Exemplos: radiação beta e radiação gama (ajuste no núcleo); raios X característico (ajuste na estrutura eletrônica); raios X de freamento (interação de partículas carregadas com o núcleo); raios delta (interação de partículas ou radiação com elétrons das camadas eletrônicas com alta transferência de energia).

A radiação eletromagnética é constituída por vibração simultânea de campos magnético e elétrico, perpendiculares entre si, originados durante a transição, pela movimentação da carga e momento magnético da partícula, quando modifica seu estado de energia, caracterizado pelo momento angular, spin e paridade. As radiações eletromagnéticas ionizantes de interesse são os raios X e a radiação gama.

Raios X é a denominação dada à radiação eletromagnética de alta energia que tem origem na eletrosfera ou no freamento de partículas carregadas no campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons.

Há o uso do termo “partícula”, porque algumas radiações possuem massa, e também o termo “fóton” à qual não deve ser atribuído o termo “partícula”, pois os fótons são desprovidos de massa e considerados um tipo de radiação eletromagnética.

Resumidamente, radioatividade é o atributo de alguns átomos, durante o processo de desintegração, emitir energia sob forma de radiação, ou seja, é a transmissão de energia através do espaço na forma de partículas ou ondas, e a desintegração é o processo de estabilização do átomo radioativo, ocorrendo de várias formas [10]:

- Desintegração Alfa (α)

As partículas alfa são núcleos de hélio, constituídos por dois prótons e dois nêutrons, com duas cargas positivas.

A reação de desintegração alfa pode ser assim esquematizada:

sendo Q a energia liberada no processo de desintegração, oriunda da diferença de massa existente entre o núcleo pai e os produtos da desintegração.

As partículas alfa são emitidas com energias discretas e características do núcleo pai. A desintegração alfa é característica de núcleos pesados ($Z > 82$), salvo exceções, sendo que a maioria dos núclídeos emissores alfa são naturais.

- Desintegração Beta (β)

A desintegração beta tanto pode ser negativa (emissão de elétrons), quando o núcleo está com excesso de nêutrons, como positiva (emissão de pósitrons), ou seja, partículas com massa igual à do elétron, mas com carga positiva, quando o núcleo está com excesso de prótons, conforme descrito a seguir.

- Desintegração Beta Negativa (β^-)

Quando o núcleo possui um nêutron em excesso, este é convertido em um próton e uma partícula beta negativa.

Aqui, ν representa o antineutrino⁶, partícula sem carga, com massa de repouso extremamente pequena e que se desloca à velocidade da luz.

A partícula beta negativa possui as mesmas características dos elétrons atômicos, porém tem origem no núcleo. A emissão de partícula β^- é diferente das emissões α uma vez que as partículas β^- são emitidas em um espectro contínuo de energia, variando de zero até um valor máximo, característico do núcleo pai. Esta energia máxima está na faixa de 0,05 - 3,5 MeV⁷, para os núclídeos mais comuns.

Como o núcleo possui níveis de energia discretos, a emissão de uma partícula com espectro contínuo de energia é explicada pela emissão de uma segunda partícula, neste caso o antineutrino. O antineutrino transporta a diferença de energia existente entre a energia da partícula beta negativa e a energia disponível, dada pela diferença de massa entre o núcleo pai e os produtos da desintegração (Q).

⁶ A necessidade de conservação de energia e de paridade no sistema durante o processo de decaimento beta levou Pauli à formulação da hipótese da existência de uma partícula, que dividiria com o elétron emitido, a distribuição da energia liberada pelo núcleo no processo de decaimento. A teoria foi posteriormente confirmada, sendo verificada a presença do neutrino ν na emissão β^+ e do anti-neutrino $\bar{\nu}$ na emissão β^- . O neutrino é uma partícula sem carga, de massa muito pequena em relação ao elétron, sendo, por esse motivo, de difícil detecção. (TAUHATA et al, 2003, p. 20).

⁷ Elétron-volt é uma unidade de medida de energia. Equivale a $1,602\,177\,33\,(49) \times 10^{-19}$ joules. Um elétron-volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo. Os múltiplos do Elétron-Volt largamente utilizados são: keV (quilo eV): mil elétrons-volt = 10^3 elétrons-volt; MeV (mega eV): 1 milhão de elétrons-volt = 10^6 elétrons-volt; GeV (giga eV): 1 bilhão (mil milhões) de elétrons-volt = 10^9 elétrons-volt; TeV (tera eV): 1 trilhão (mil bilhões) de elétrons-volt = 10^{12} elétrons-volt.

- Desintegração Beta Positiva (β^+)

Quando o núcleo possui um próton em excesso, este é convertido em um nêutron e uma partícula beta positiva (pósitron).

O pósitron possui a mesma massa do elétron e sua carga tem valor absoluto igual à do elétron, porém com sinal positivo. De maneira análoga às partículas beta negativas, as partículas beta positivas são emitidas em um espectro contínuo de energia. Neste caso, a energia máxima está na faixa de 0,3 - 1,4 MeV, para os núclídeos mais comuns.

- Desintegração por Captura Eletrônica

O processo de captura eletrônica compete com o de desintegração beta positiva, isto é, também ocorre quando o núcleo possui um excesso de prótons. Em certos casos, a probabilidade do mesmo núcleo se desintegrar por qualquer um desses dois processos é comparável. Assim, o núcleo, ao invés de emitir um pósitron, captura um elétron de seu próprio átomo, convertendo um de seus prótons em nêutron e liberando um neutrino monoenergético, o qual transporta a energia disponível no processo.

O elétron da camada K é o que tem maior probabilidade de ser capturado, em razão da sua maior proximidade do núcleo. Entretanto, este processo pode ocorrer também com elétrons de camadas mais externas. Após a captura do elétron, este deixará uma vaga no seu nível orbital, que será preenchida por outro elétron de camadas mais externas, dando origem à emissão de raios-X (chamados de característicos).

- Conversão Interna e Elétron Auger [11]

A transição de um nível excitado de um núcleo (energia em excesso) para um nível inferior do mesmo núcleo pode ser efetuado sem a emissão de radiação eletromagnética, raios gama.

A energia W em excesso usada na transição nuclear pode ser diretamente transferida a um elétron ligado, geralmente da camada K do próprio átomo. Este fenômeno conhecido como conversão interna compete com a emissão de radiação gama pelo núcleo.

O elétron será emitido com uma energia cinética E_i dada por:

$$E_i = W - B_e$$

onde B_e é a energia de ligação do elétron à sua órbita.

Durante o processo de captura eletrônica forma-se uma vacância de elétron na camada K. Neste caso um elétron da camada mais externa L, M etc procura perder parte de sua energia de ligação ocupando a vacância da camada K, emitindo um raio X característico, como por exemplo com energia $B_K - B_L$ que são as energias de ligação das camadas K e L.

Se ocorrer que $B_K - B_L$ for maior que o próprio B_L , o elétron da camada L pode ser ejetado do átomo em vez de ocupar a camada K. Ele recebe o nome de elétron Auger [12]. Este fenômeno ocorre com maior frequência nos elementos químicos leves enquanto que a emissão de raio X característicos ocorre mais frequentemente nos elementos químicos mais pesados.

- Desintegração com Emissão Gama (γ)

Em muitos casos, após ocorrer um dos tipos de desintegração descritos anteriormente, o processo radioativo se completa. Em outros, o núcleo filho é formado em um de seus estados excitados, contendo, ainda, um excesso temporário de energia. Quando isto ocorre, o núcleo filho emite essa energia armazenada sob a forma de raios gama (γ).

A radiação gama pertence a uma classe conhecida como radiação eletromagnética. Este tipo de radiação consiste de pacotes de energia (quanta) transmitidos em forma de movimento ondulatório. A radiação eletromagnética é uma modalidade de propagação de energia através do espaço, sem necessidade de um meio material. Outros membros bem conhecidos desta classe são: ondas de rádio, raios-X e, inclusive, a luz visível.

A diferença essencial entre a radiação γ e a radiação X está na sua origem, enquanto os raios γ resultam de mudanças no núcleo, os raios-X são emitidos quando os elétrons atômicos sofrem uma mudança de orbital. Os raios γ são emitidos dos núcleos radioativos com energias bem definidas, correspondentes à diferença entre os níveis de energia de transição do núcleo que se desexcita. A transição pode ocorrer entre dois níveis excitados ou entre um nível excitado e o nível fundamental. Deste modo, pode haver a emissão de um ou mais raios γ em cada desintegração.

Por exemplo, o ^{60}Co , após desintegração beta, tem como resultado o segundo nível de excitação do ^{60}Ni que, como consequência, emite dois gamas, um de 1,17 MeV e outro de 1,33 MeV. A energia dos raios gamas emitidos pelos diferentes nuclídeos está, aproximadamente, na faixa de 0,03 – 3 MeV.

O termo desintegração pode ser confundido como se o átomo estivesse se destruindo. Isto se dá em decorrência ao antigo conceito de radioatividade que imaginava ao emitir radiações ele estava se desintegrando, isto não ocorre, sabe-se que a emissão de radiações justamente é para que o mesmo se auto-organize ou estabilize.

A explanação das diferentes formas de desintegrações define a origem e características da partícula ou da radiação eletromagnética. Este processo de desintegração é conhecido como decaimento radioativo.

2.4.1 Grandezas físicas de proteção radiológica

Grandezas físicas na área de radioproteção referem-se à quantificação de medições usando a própria radiação ou seus efeitos indiretos. Há instituições internacionais que cuidam das definições das grandezas, as relações entre elas e suas unidades [13].

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR), fundada em 1928, que estabelece recomendações e desenvolvimentos da radioproteção e

limites de dose de radiação⁸; e a Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação, CIUR, fundada em 1925, cuida especialmente das grandezas básicas e das operacionais⁹; normatizadas pela norma CNEN-NN-3.01.

A grandeza Atividade (A) de uma fonte¹⁰ radioativa é definida como uma quantidade de radionuclídeo em um determinado estado de energia em um instante de tempo; ou seja, $A = dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt. A unidade no sistema internacional, que representa esta grandeza, é o recíproco do segundo (s^{-1}), denominada becquerel (Bq).

Meia-vida é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial. Isso significa que, para cada meia-vida que passa, a atividade vai sendo reduzida à metade da anterior, até atingir um valor insignificante, que não permite mais distinguir suas radiações das do meio ambiente. Dependendo do valor inicial, em muitas fontes radioativas utilizadas em situações práticas, após decaírem de um fator 10 (dez) não são mais úteis para as funções às quais foram criadas. Entretanto, não se pode confiar totalmente nessa informação, pois, em várias fontes usadas na indústria e na medicina, mesmo após decaírem de um fator 10 podem ser utilizadas para outras atividades.

Fluência (Φ) de partículas é o quociente de dN/da, sendo que dN é o número de partículas incidentes sobre uma esfera de seção de área da, na unidade de m^{-2} . O número de partículas N pode corresponder às seguintes formas: emissão, transferências ou recebidas. Grandeza muito utilizada na medição de nêutrons.

Exposição (X) é o quociente entre dQ por dm, no qual dQ é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa dm, são completamente freados no ar, ou seja:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (C. kg^{-1})$$

⁸ Quando os efeitos das interações acontecem no organismo humano e se as suas consequências podem ser deletérias, podem-se definir limites de dose, para indicar o risco à saúde humana causada pela a radiação ionizante. (TAUHATA, et al, 2002, p. 129).

⁹ Levando em consideração as atividades de Radioproteção pode-se definir limites de dose mais consistentes ou úteis nas práticas, por exemplo, de monitoração de área e de monitoração individual. (TAUHATA, et al, 2003, p. 129).

¹⁰ 'Fonte' indica qualquer entidade física ou procedimento que resulte em uma dose de radiação potencialmente quantificável para uma pessoa ou grupo de pessoas. (Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação - CIUR)

Dose absorvida (D) é a grandeza dosimétrica expressa por $D = d\varepsilon/dm$, onde $d\varepsilon$ é a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa dm . A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma denominada gray (Gy).

Dose absorvida comprometida $D(T)$ é a grandeza expressa por:

$$D_T = \int_{t_0}^{t_0 + T} \dot{D}(t) dt$$

onde t_0 é o instante em que ocorre a incorporação, $\dot{D}(t)$ é a taxa de dose absorvida em um tempo t , e T é o tempo transcorrido após a incorporação das substâncias radioativas. Quando não especificado de outra forma, T tem o valor de 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para a incorporação por crianças.

Dose efetiva (E) é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos:

$$E = \sum_T w_T H_T (T)$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e w_T é o fator de ponderação de órgão ou tecido. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv) [12].

Querma (k) é definido pela relação [10]:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (J.kg^{-1} = gray)$$

onde dE_{tr} é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa dm .

Como o Querma inclui a energia recebida pelas partículas carregadas, normalmente elétrons de ionização, estes podem dissipá-la nas colisões sucessivas com outros elétrons, ou na produção de radiação de freamento (bremsstrahlung), assim:

$$K = K_c + K_r$$

onde K_c = querma de colisão, quando a energia é dissipada localmente, por ionizações e/ou excitações e K_r = querma de radiação, quando a energia é dissipada longe do local, por meio dos raios X

2.4.2 Interação da Radiação Ionizante com a Matéria

As radiações eletromagnéticas ionizantes de interesse são as radiações X e gama, em decorrência de seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso; essas radiações podem penetrar em um material, percorrendo grandes espessuras antes de sofrer a primeira interação.

A possibilidade de penetrar na matéria pelos raios X e gama é muito maior que a das partículas carregadas, e a probabilidade de interação depende muito do valor de sua energia. Os principais modos de interação, excluindo as reações nucleares, são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares [10].

2.4.2.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico [10], mostrado na Figura 9, possui a característica de transferir totalmente a energia da radiação X ou gama a um único elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética E_c bem definida:

$$E_c = h \nu - B_e$$

onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação e B_e é a energia de ligação do elétron orbital.

Figura 9 – Representação do Efeito Fotoelétrico
Fonte: TAUHATA, et al [10]

Para energias elevadas (acima de 3 MeV), a probabilidade do elétron sair na direção e sentido do fóton é grande; para energias pequenas (abaixo de 20 keV) a maior probabilidade é a de sair com um ângulo de 70° . Isto surge em decorrência da ação dos campos elétrico e magnético que, variando na direção perpendicular à de propagação do fóton, exercem força sobre o elétron na direção de 90° .

O efeito fotoelétrico é predominante para energias pequenas e para elementos químicos de elevado número atômico.

2.4.2.2 Efeito Compton

No efeito Compton [10] o fóton expulsa um elétron de energia de ligação pequena, que recebe somente parte de sua energia, continuando sua trajetória no interior do material em outra direção. Sua distribuição no espectro de contagem é aleatória, aproximadamente retangular, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Representação do Efeito Compton
Fonte: TAUHATA, et al [10]

2.4.2.3 Formação de Pares

Uma das formas predominantes de interação da radiação eletromagnética de energia elevada é a formação de par elétron-pósitron [10]. Este efeito ocorre

quando fótons de energia superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear. Nesta interação, a radiação dá origem a um par elétron-pósitron, como mostrado na Figura 11.

As duas partículas transferem a sua energia cinética para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio e dá origem a dois fótons com energia de 511 keV cada.

Figura 11 – Representação do Efeito de produção de pares
Fonte: TAUHATA, et al [10]

As interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente pequenas, mas à medida em que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente e o efeito Compton cresce e acaba se tornando predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absolutos, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico.

Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons, conforme mostrado pela Figura 12. As duas linhas indicam a mesma probabilidade de ocorrerem os dois efeitos interativos adjacentes.

Figura 12 - Processos de interação dos fótons com a matéria
 Fonte: TAUHATA, et al [10]

Z = número atômico do elemento

$h\nu$ = energia da radiação eletromagnética.

2.4.3 Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante

Antes de se chegar aos efeitos biológicos provenientes de uma exposição à radiação ionizante, são produzidos outros efeitos iniciais, como os efeitos físicos, os químicos, bioquímicos e após então os efeitos biológicos.

Iniciando pelos efeitos físicos, a exposição de uma pessoa à radiação ionizante resulta no surgimento de muitos elétrons e íons livres, radicais produzidos na quebra das ligações químicas e energia cinética adicional proveniente da cessão de energia da radiação pela colisão com o tecido.

Grande parte desta energia cedida pelas radiações eletromagnéticas, raios X e gama produz a excitação de átomos e moléculas do tecido humano. Estes efeitos se propagam em decorrência ao grande poder de penetração da radiação; diferentemente, no caso da radiação beta, os efeitos são mais superficiais em razão

do pouco poder de penetração, obviamente dependendo diretamente da sua energia.

Já as partículas alfa não conseguem ultrapassar a epiderme que é considerada insensível para os efeitos biológicos da radiação. Contudo, em situações de contaminação por inalação ou ingestão de radionuclídeos alfa-emissores, os efeitos danificam gravemente as células de alguns órgãos ou tecidos, em virtude da grande concentração de elétrons produzidos na interação.

Os efeitos químicos são aqueles produzidos no interior das células, já que são compostas por átomos, afetando seu metabolismo e alterando a estrutura de uma grande variedade de substâncias que as compõem, surgindo radicais livres, íons e agentes oxidantes, que podem atacar moléculas importantes da célula, inclusive as substâncias que compõem o cromossomo.

Um radical livre é um átomo ou uma molécula eletronicamente neutra contendo elétrons não pareados nos orbitais exteriores. É muito reativo podendo ser oxidante ou redutor. Geralmente, são intermediários entre os pares de íons e os produtos químicos finais. Em decorrência dos sistemas biológicos serem formados por 70 a 80% de água, a maioria das ionizações primárias nos tecidos vivos ocorre nas moléculas de água. A interação direta da radiação com a água resulta em excitação, superexcitação e ionização, e o efeito indireto da radiação é causado pela radiólise da água.

Os efeitos biológicos são provenientes das alterações bioquímicas que se seguem às químicas, provocadas pela radiação, afetando uma célula de inúmeras maneiras, como: morte prematura, impedimento ou retardo de divisão celular ou modificação permanente que é transferida para as células de gerações futuras.

O efeito biológico é a resposta do organismo ou parte dele, aos efeitos diretos ou indiretos produzidos pela radiação. Logo, ao aparecerem estas respostas, não significa que a pessoa tenha uma enfermidade. Quando a quantidade de efeitos biológicos é pequena, o organismo pode se recuperar, sem que sejam clinicamente detectadas.

Ressalta-se que os efeitos biológicos provocados pela radiação ionizante dependem de fatores como dose total recebida, se foi aguda ou crônica, se localizada ou de corpo inteiro.

Os efeitos biológicos da radiação não são somente causados por ela, mas por outros agentes, como é o caso do câncer que pode surgir pelo uso do cigarro.

Portanto a radiação não provoca qualquer enfermidade que já não seja conhecida pelo homem causada por outros agentes.

As interações da radiação ionizante com o corpo humano produz efeitos estocásticos e determinísticos (também conhecidos como reações no tecido) [14]. Aqueles são para os quais a probabilidade de ocorrência de um efeito é função da dose sem um limiar de ocorrência, como por exemplo, o câncer; e as reações no tecido, são aqueles para os quais a gravidade do efeito varia com a dose, existindo um limiar para a sua ocorrência, por exemplo, eritema de pele. Isso resulta em uma implicação importante, a de que existirá sempre a probabilidade de um efeito, por menor que seja a dose. Portanto, a proteção radiológica deve prevenir a ocorrência dos detrimientos provocados pelas reações no tecido, e limitar a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos a níveis aceitáveis.

Fato interessante também é a questão do ser humano temer aquilo que desconhece, estabelecendo credices. Vale lembrar do preconceito ocorrido após o acidente em Goiânia em setembro de 1987¹¹, onde pessoas que estavam nas proximidades do evento demonstraram elevado preconceito. As pessoas não sabem que as alterações causadas pelas radiações ionizantes não se transmitem a outras células, organismos, ou pessoas. Entretanto, cabe observar que são transmissíveis apenas aquelas alterações que ocorrem no patrimônio hereditário das células germinativas, podendo os efeitos aparecerem nos descendentes do indivíduo irradiado.

O limiar é a dose mínima necessária para que certos efeitos ocorram, contudo alguns efeitos não apresentam dose limiar; são conhecidos como efeitos estocásticos, para os quais não existe um limiar de dose para sua ocorrência e cuja probabilidade de ocorrência é uma função da dose; e as reações no tecido, para os quais existe um limiar de dose absorvida necessário para sua ocorrência e cuja gravidade aumenta com o aumento da dose.

O estabelecimento de um limiar não significa que não houve ação, mesmo para doses pequenas ocorrem fenômenos físicos, químicos e biológicos, mas os efeitos não aparecem clinicamente detectáveis, quer seja por restauração quer seja pela substituição das células.

¹¹ O acidente deu-se pelo furto de um aparelho, anteriormente utilizado para tratamento em radioterapia das instalações de um hospital desativado e abandonado. O aparelho possuía uma fonte radioativa de ¹³⁷Cs compactado e duplamente selado em cápsulas de aço inoxidável.

Não existe uma dose segura de exposição de radiação sob o ponto de vista genético, sendo que qualquer exposição à radiação pode envolver certo risco de indução de efeitos hereditários e somáticos [15].

Os efeitos somáticos ocorrem em decorrência da irradiação de células somáticas podendo ser imediatos ou tardios, não sendo transmissíveis aos descendentes; os efeitos hereditários ocorrem em decorrência à irradiação de células das gônadas (ovários ou testículos), podendo ser transmitidos aos descendentes do indivíduo irradiado.

Neste ponto torna-se clara a postura da radioproteção ao objetivar em evitar reações no tecido, limitar a probabilidade de efeitos estocásticos e assegurar que as atividades com a presença de radiação sejam justificadas e otimizadas.

Nenhuma atividade com radiação é aceita a não ser que produza um benefício líquido positivo; todas as irradiações de pessoas devem ser mantidas tão pequenas quanto racionalmente exequível; e as doses recebidas pelos indivíduos não excederão aos limites recomendados em cada circunstância.

A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na Tabela 7, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN [13].

Tabela 7 – Limites de doses

Limites de Dose Anuais [a]			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv [b]	1 mSv [c]
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv [b]	15 mSv
	Pele [d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

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

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

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

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

Os valores de dose efetiva se aplicam à soma das doses efetivas, causadas por exposições externas, com as doses efetivas comprometidas (integradas em 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano.

A variação dos valores em milisievert descritos na Tabela 7 está relacionada ao conceito de radiosensibilidade das células desenvolvido anteriormente; convém explicar que na coluna “órgão - mãos e pés ” para os indivíduos do público não é estabelecido limite de dose anual; isto se deve ao fato ser injustificável que um indivíduo do público manuseie fontes radioativas ou se aproxime com as mãos ou pés.

Neste contexto há os efeitos biológicos agudos das radiações ionizantes que podem levar ao perecimento do indivíduo e são de três tipos diferentes, a saber:

a) Ataque aos órgãos hematopoéticos, isto é, aos órgãos formadores do sangue; as primeiras mortes se dão a partir de 2 Gy recebidos em menos de meia hora. Em 3 Gy temos a morte de 50% dos indivíduos nos primeiros 60 dias após a exposição, representada por $DL_{50,60}$, que significa dose letal 50% nos primeiros 60 dias. A dose letal 100% se dá com 4 Gy. Todas estas doses letais ocorrem se não houver nenhum cuidado médico [14].

b) Doses superiores aos 6 Gy até por volta dos 15 Gy o ataque se dá no sistema gastrointestinal e o período de vida é inferior a 15 dias. O que ocorre é uma descamação do epitélio intestinal e como consequência translocação bacteriana das fezes para o sistema circulatório [14].

c) Doses superiores a 15 Gy o ataque das radiações ionizantes se dá ao sistema cardiovascular, neurovascular e cerebral. O indivíduo morre em alguns dias [14].

Com o tratamento médico e com as atuais máquinas que separam os elementos que compõem o sangue, pelos resultados de Chernobyl chegou-se a uma DL_{50} de 8 Gy e DL_{100} de 15 Gy. Evidenciou-se ainda que uma futura melhoria na posologia a DL_{50} irá para 10 Gy o que significa que com cuidados médicos já não se morre pelo ataque aos órgãos hematopoéticos. As investigações para cura devem continuar para o ataque ao sistema gastrointestinal e ao sistema cardiovascular, neurovascular e cerebral.

Em doses crônicas os órgãos mais sensíveis para os efeitos que provocam reações no tecido são os órgãos hematopoéticos, com uma dose limiar de 1 Sv; as enfermidades provocadas são leucopenia e a anemia.

As recomendações internacionais sugerem que sejam encaminhados aos médicos, para acompanhamento de todos os indivíduos com doses agudas

superiores a 10 vezes os limites anuais dos trabalhadores [15] e [16]. As normas da CNEN [13] continuam com os valores antigos, isto é, 2 vezes o limite anual.

3. PREÂMBULO AO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1. Considerações sobre as propriedades de alguns radioisótopos

O principal objetivo da escolha de alguns radioisótopos é o de esclarecer aos especialistas em explosivos algumas características destes elementos. Os radioisótopos escolhidos para o desenvolvimento do estudo foram selecionados entre aqueles de interesse médico e industrial que se encontram em maior quantidade e que além do caráter nocivo à saúde poderão provocar um maior dano psíquico na população.

Desta forma, foram escolhidos os seguintes radionuclídeos: cobalto, iodo e irídio, observando a questão daqueles mais frequentes em nosso país, nas áreas médica e industrial.

Cabe uma ressalva quanto à questão de não terem sido escolhidos radioisótopos da área nuclear, pois o controle de segurança de acesso sobre estes materiais são mais rigorosos que os demais, como é o caso do Urânio (U) e Plutônio (Pu).

3.1.1 O Cobalto

O cobalto é um metal duro, branco prateado, que ocorre na natureza como ^{59}Co , mostrado na Figura 13. O Cobalto é um componente dos minerais cobaltita, esmaltite, eritrina, e outros minérios, e é normalmente encontrado em associação com o níquel, prata, chumbo, cobre e ferro. A produção de Cobalto metálico puro é realizada pela redução dos seus compostos com alumínio, carbono ou hidrogênio. É semelhante ao ferro e níquel em suas propriedades físicas, possui ductilidade pequena às condições normais de temperatura, e é um componente de várias ligas. [17]

Há nove grandes isótopos radioativos do cobalto. Destes, apenas o ^{57}Co e ^{60}Co possuem meias-vidas suficientes para justificar o seu amplo uso. A meia-vida de todos outros isótopos são inferiores a 80 dias. O ^{57}Co decai com uma meia-vida

de 270 dias por captura de elétrons e o ^{60}Co decai com meia-vida de 5,3 anos por emissão de uma partícula beta com dois raios gama energéticos; a energia combinada dos dois raios gama é 2,5 MeV (um tem uma energia de 1,2 MeV e o outro possui uma energia de 1,3 MeV). [18]

Há um vasto uso do Cobalto em superligas usadas em turbinas de aviões, ligas resistentes à corrosão, aços rápidos, ferramentas de diamante, catálise do petróleo e indústria química, revestimentos metálicos por eletrodeposição em decorrência ao seu aspecto, dureza e resistência à corrosão, secante para pinturas, revestimento à base de esmaltes vitrificados e eletrodos de baterias elétricas [17].

O radioisótopo ^{60}Co é usado como fonte de radiação gama em radioterapia, conforme Figura 14, esterilização de alimentos e radiografia industrial para o controle de qualidade de metais (detecção de fendas).

Figura 13 Cobalto. [19]

Figura 14 - Fonte de ^{60}Co transportada ao Hospital das Clínicas em 2010.[20]

A Tabela 8 fornece duas informações importantes: o ponto de fusão e o ponto de ebulição do Cobalto.

Tabela 8 – Propriedades físicas e químicas do cobalto [21]

Propriedades físicas e químicas do cobalto	
Número atômico	27
Peso atômico	58,9332
Ponto de fusão	1495° C
Ponto de ebulição	2908° C
Densidade (20° C)	8,9 g/cm ³
Estados de oxidação	+2, +3

O ponto de fusão é temperatura à qual uma substância passa do estado sólido ao líquido nas condições normais de pressão, coexistindo ambas as fases (sólida e líquida) em equilíbrio. O ponto de ebulição é a temperatura em que uma substância passa do estado líquido ao gasoso.

No processo de uma explosão, com o aumento da temperatura em um curto espaço de tempo, o cobalto mudará do estado sólido para o gasoso em milésimos de segundos, voltando ao estado sólido ao retorno da temperatura ambiente sem, contudo, alteração de suas propriedades radioativas.

3.1.2 O Iodo

O Iodo é um sólido brilhante de cor preto-azulado que ocorre principalmente na natureza como estável o ^{127}I , mostrado na Figura 15; volatiliza-se à temperatura ambiente em um gás azul-violeta com um odor muito irritante. Dos quatorze principais isótopos radioativos de iodo, somente o ^{129}I tem uma meia-vida suficientemente longa, decai emitindo partículas beta com uma meia-vida de cerca de 16 milhões de anos; as meias-vidas de todos os outros radionuclídeos de iodo são menores de 60 dias. O ^{131}I tem uma meia-vida de 8 dias.

A forma estável, ^{127}I , está naturalmente presente em algas, esponjas e outros materiais. Isótopos radioativos de iodo são produzidos por fissão nuclear. O ^{131}I é usado para uma série de procedimentos médicos, inclusive para monitorar e

rastrear o fluxo de tiroxina da tiróide. O ^{129}I não tem usos comerciais importantes. [22]

Figura 15 - Cristal de iodo. [23]

3.1.3 O Irídio

Irídio é um metal branco-prateado com o nome da palavra latina para arco-íris, pois seus sais são altamente coloridos, como mostrado na Figura 16. É duro e quebradiço, com pequena ductilidade, o que torna muito difícil o seu uso. Sua densidade é cerca de duas vezes a do chumbo, ocorrendo na natureza com dois isótopos estáveis: ^{193}Ir é a forma mais prevalente, compreendendo cerca de 63% de irídio natural, sendo o restante contabilizado para o ^{191}Ir . Dos 15 principais isótopos radioativos do Irídio, apenas três possuem meias-vidas maiores de um mês.

$^{192\text{m}}\text{Ir}$ é o isótopo de maior disponibilidade, pois é utilizado em grande número de aplicações industriais e médicas.

O Irídio é encontrado na natureza combinado com a platina e outros metais do grupo da platina, e pode ser obtido a partir de minérios de platina, e como um subproduto da mineração de níquel.

Além de sua utilização como agente endurecedor em ligas de platina, é usado para fabricar cadinhos e outros dispositivos que requerem temperaturas elevadas, como velas de ignição. Na indústria química é usado como um catalisador para a carbonilação do metanol produzindo ácido acético [24].

Figura 16 - Irídio.[25]

3.2 Bombas de dispersão de radiação ionizante

Os dispositivos de dispersão de radiação ionizante (DDR), também conhecidos vulgarmente como bombas sujas, são artefatos construídos de forma artesanal que utilizam como carga um explosivo convencional (industrial) ou improvisado, mesclados a um material radioativo; incluem-se também neste contexto os rejeitos radioativos, com o objetivo de espalhar o material radioativo ao redor do epicentro da explosão. Pode ser também qualquer método utilizado para dispersar deliberadamente material radioativo para criar terror ou dano. Uma bomba suja é um exemplo de uma DDR. É construído utilizando-se explosivos com material radioativo, sendo distribuído quando houver a explosão [26].

Há uma abordagem interessante nesta definição; considera-se que um DDR seria qualquer método utilizado para dispersar material radioativo em um determinado local e neste contexto englobaria o espalhamento manual da substância com o objetivo de expor pessoas aos efeitos da radiação, portanto a “bomba suja” seria uma modalidade de dispositivo que se utiliza dos efeitos da explosão para realizar a dispersão.

Nesta mesma linha de pensamento, uma bomba suja não poderia de forma alguma comparar-se a uma arma nuclear ou bomba nuclear, pois esta libera quantidades de energias incomparáveis com relação às aquelas.

Fato importante é que a montagem deste tipo de bombas é norteadada por conceitos complexos e condições precisas de fabricação, sendo utilizados altos explosivos específicos [27].

Claramente é verificado que a fabricação de bombas nucleares envolve precisão em inúmeros procedimentos, diferentemente das bombas sujas, que comparadas àquelas não necessitam de conhecimentos técnicos avançados.

O propósito de um DDR é o de criar pânico e caos no local da explosão, com o objetivo de, além das vítimas provenientes da explosão, criar um grande alarme social.

As consequências da explosão de um DDR seriam inicialmente os danos à saúde pelas mortes e ferimentos causados pelos efeitos da explosão e possíveis reações no tecido em razão da exposição aguda à radiação; e a médio e longo prazo os efeitos estocásticos causados pela dispersão de material radioativo.

Sequencialmente, viriam impactos econômicos derivados da resolução da ocorrência, como problemas no transporte público, comércio e nas propriedades locais, pois o desconhecimento pela população, bem como as crenças sobre os efeitos da radiação ionizante, levariam de forma precipitada a empresas de ônibus desviar os trajetos de possíveis linhas que passariam pelo local, o comércio seria prejudicado pela diminuição do trânsito de pessoas e por fim a desvalorização dos imóveis da região.

Finalmente, surgiriam os impactos psicossociais envolvendo o lado emocional das vítimas diretamente envolvidas e de maneira indireta por serem parentes e amigos por causa do preconceito.

A extensão dos danos dependerá de muitos fatores: quantidade da carga explosiva, geografia, condições meteorológicas, concentração de pessoas no local; tipo, quantidade e forma física dos materiais radioativos empregados e a atividade da fonte radioativa.

3.2.1 Aspectos comuns entre a explosão e a radiação.

A radioproteção estipula algumas considerações para ampliar a segurança, sendo tempo, distância e blindagem conceitos muito importantes e devem ser bem compreendidos.

As radiações externas podem ser controladas operando-se com três parâmetros: tempo, distância e blindagem (ou barreira). A dose acumulada por uma pessoa que trabalha numa área exposta a certa taxa de dose é diretamente proporcional ao tempo em que ela permanece na área. Essa dose pode ser controlada pela limitação desse tempo [10]:

$$\text{Dose} = \text{Taxa} \times \text{Tempo}.$$

Devem ser empregadas formas de redução na dose do trabalhador durante sua permanência na área de trabalho; os recursos mais utilizados são: o aumento da distância ou a introdução de blindagem entre o homem e a fonte de radiação. Deve-se sempre ter em mente que quanto menor o tempo de permanência neste local, menores serão os efeitos causados pela radiação. Porém, o recurso mais eficaz de redução do tempo de execução de uma tarefa é o treinamento do operador a fim de otimizar sua habilidade.

Para uma fonte puntiforme de radiação, emitindo em todas as direções, o fluxo, que é proporcional à taxa de dose numa determinada distância r da fonte, é inversamente proporcional ao quadrado dessa distância. Cabe lembrar que essa relação somente é verdadeira para uma fonte puntiforme, um detector puntiforme e absorção desprezível entre a fonte e o detector. A lei do inverso do quadrado da distância é dada por:

$$\frac{D_1}{D_2} \propto \frac{(r_2^2)}{(r_1^2)}$$

onde D_1 é a taxa de dose à distância r_1 da fonte e D_2 é a taxa de dose à distância r_2 da fonte.

Note-se que dobrando a distância entre a fonte e o detector, reduz-se a taxa de dose a $\frac{1}{4}$ de seu valor inicial. Dessa forma, o modo mais fácil de defender-se contra as radiações ionizantes é ficar longe da fonte.

Pessoas que trabalham com fontes ou geradores de radiação ionizante devem dispor de procedimentos técnicos bem elaborados de modo que o objetivo da tarefa seja concretizado e sua segurança esteja garantida contra exposições desnecessárias ou acidentais. Nesses procedimentos, os fatores tempo e distância em relação às fontes radioativas estão implícitos na habilidade e destreza de um técnico bem treinado para a tarefa. Por não apresentar hesitações durante sua execução, sua duração é mínima; por dominar todos os elementos do processo, não comete enganos, se posiciona no lugar adequado e com a postura correta.

Entretanto, em certas situações, principalmente quando se opera com fontes intensas ou níveis elevados de radiação, além de colimadores, aventais, labirintos e outros artefatos, é necessário introduzir outro fator de segurança: a blindagem. A escolha do material de blindagem depende do tipo de radiação, atividade da fonte e da taxa de dose que é aceitável fora do material de blindagem [10].

Supondo que uma fonte de ^{192}Ir esteja exposta, ou seja, fora de sua blindagem, a taxa de dose medida a 2 metros é de $dD/dt=1,72 \text{ mSv/h}$.

Por meio da lei do inverso do quadrado da distância pode-se calcular a taxa de dose absorvida a 1 metro:

$$\frac{dD}{dt}(1\text{m}) = \frac{1,72 \text{ mSv}}{h} * (2\text{m})^2$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = 6,88 \text{ mSv/h}$$

Se o conceito do tempo é expresso por Dose = Taxa x Tempo, então para um trabalho de 1 hora a 1 metro de distância desta fonte o trabalhador receberá a dose de 6,88 mSv; caso o trabalho seja de 2 horas ele receberá 13,76 mSv.

A distância é uma regra importante; em hipótese alguma alguém deve tocar a fonte com as mãos; com os mesmos parâmetros, variando a distância, os valores aumentam muito, pois seguem a lei do inverso do quadrado da distância; pode-se agora calcular para a distância em 0,5 m, supondo assim que o valor da distância seja bem próxima à fonte:

$$\frac{1,72 \text{ mSv}}{\text{h}} * (2\text{m})^2 = \frac{dD}{dt} (0,005\text{m})^2$$

$$\dot{D} = 275200 \frac{\text{mSv}}{\text{h}} \text{ taxa de dose à distância de 0,5 cm.}$$

Da mesma forma, para um trabalho de 1 hora a 0,5 cm de distância desta fonte o trabalhador receberá a dose de 275200 mSv ou 275,2 Sv, isto seria uma dose letal. A dose efetiva, prevista em norma, no corpo inteiro para o trabalhador seria de 20 mSv/ano, sendo a média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

Nos primeiros cálculos em um trabalho de 1 hora a 1 metro de distância desta fonte o trabalhador recebeu a dose de 6,88 mSv, está abaixo do previsto, mas pode-se otimizar este resultado dividindo-se a carga de trabalho.

Divide-se a 1ª hora em mais trabalhadores, cada um ficaria com uma função específica junto à fonte. Em quatro trabalhadores cada um ficaria 15 minutos, logo a 1 metro receberiam uma dose efetiva de:

Dose = Taxa x Tempo; então:

$$\text{Dose} = 6,88 \text{ mSv/h} \times 0,25 \text{ h} = 1,72 \text{ mSv.}$$

Trabalhando um tempo menor, diminui-se a dose efetiva, mas mesmo com este conceito não se deve aproximar a ponto de tocar a fonte. Com o valor de 275,2 Sv em 1 hora de trabalho a 0,5 cm da fonte, alterado o tempo para os mesmos 15 minutos e os novos valores serão:

Dose = Taxa x Tempo; então:

$$D = 275,2 \text{ Sv} \times 0,25 \text{ h} = 68,8 \text{ Sv}$$

A dose efetiva está muito acima do limite, ainda é considerada letal; os cálculos demonstraram que as regras devem ser trabalhadas em conjunto: não convém aproximar-se da fonte e manuseá-la rapidamente.

Algumas propriedades presentes nos efeitos da explosão e também na radiação são semelhantes, o que auxiliará na tomada de decisão no atendimento de eventos onde haja o aparecimento de ambos.

O efeito polidirecional é um deles, ou seja, tanto a radiação quanto os efeitos da explosão iniciam em um ponto central e se afastam deste em todas as direções, independente da existência ou não de barreira existente. No caso da existência desta haverá um freamento ou parada da radiação; e o mesmo conceito vale para a onda de choque.

No conceito de freamento ou parada, há a abordagem da blindagem ou proteção que para fazer frente aos efeitos de ambas necessita de materiais específicos que protegem o homem quer seja da irradiação, da contaminação ou da pressão.

Complementando o citado, há uma outra forma de proteção que é a distância. A falta de meios materiais de proteção pode ser resolvido afastando-se da fonte radioativa ou do explosivo. A radiação acaba sendo freada pela distância, pois interage com as moléculas do ar e a onda de choque perde energia, pois a pressão atmosférica e o ar existente exercem resistência a ela. Desta forma, quanto maior a distância, menor será a possibilidade de estar sob os efeitos da radiação e da onda de choque.

3.2.2 Considerações sobre a explosão

O perigo das emergências radiológicas é muitas vezes menor do que outros perigos convencionais, como: incêndio, vazamento de produtos químicos perigosos e desabamentos provocados por explosões.

Portanto, o aspecto não-radiológico de uma emergência deste tipo sempre deve prevalecer: salvar vidas, tratamento de lesões, riscos de combate a incêndio, protegendo equipamentos críticos e a segurança de pessoas são prioridades.

As dispersões de radionuclídeos no ambiente contêm inúmeras variáveis que tornam seu estudo e, conseqüentemente, a operação no local muito complexa [28], processos naturais e artificiais influenciam a variação nas doses recebidas por uma população com o tempo, após um evento de deposição acidental. Os principais processos naturais que afetam a exposição de uma população em uma área urbana são aqueles relacionados à deposição inicial sobre as superfícies das construções urbanas, e sua subsequente fixação ou arraste, seguido, em longo prazo, por efeitos

meteorológicos. Estes processos são dependentes tanto do radionuclídeo quanto do tipo de superfície. A ressuspensão de material depositado para o ar e o transporte físico de poeira para dentro ou fora das construções pode também ser uma fonte a mais para a exposição da população e para recontaminação de superfícies.

Neste trabalho estudou-se um modelo dinâmico visando à avaliação das consequências de uma contaminação radioativa accidental em um ambiente urbano; contudo, inúmeras abordagens podem ser trazidas para logo após a ocorrência da explosão.

Após a dispersão da radiação pela explosão há um aumento de preocupações, uma vez que a extensão dos danos depende de muitos fatores: quantidade de carga explosiva, topografia, condições climáticas, concentração da população no local da explosão; quantidade, tipo e forma física dos materiais radioativos, contudo algumas condições foram definidas para este trabalho; pois caso fossem considerados todos os fatores elencados anteriormente, poderia causar dispersão e quantidades variadas de resultados, assim sendo as imposições são:

- A explosão ocorrerá em área aberta, sem edificações ou geografia demasiadamente irregular;
- A massa explosiva, bem como a substância radioativa devem estar homogeneamente mescladas, ou em recipientes frágeis, evitando a perda de energia do explosivo para romper o invólucro e dispersão do material.
- A análise será tão somente enquanto houver a energia da onda de choque em ação, não serão consideradas condições climáticas após cessar o efeito da explosão.

3.2.3 Testes de campo: Explosões Controladas

Os testes foram realizados utilizando-se o explosivo denominado Nitrato de Amônio (NH_4NO_3) grau emulsão, pela segurança em seu uso e pelo uso ilegal por criminosos em roubos a caixas eletrônicas; no ano de 2010 o GATE atendeu especificamente 8 ocorrências de explosão a caixa eletrônica e em 2011 foram 41 atendimentos.

A Tabela 9 descreve as características do produto:

Tabela 9 – Informações de segurança de produto químico.

Estado físico	Sólido
Forma	Sólido cristalino
Cor	Branca
Odor	Inodoro
Ponto de ebulição	210 °C, acima desta temperatura pode causar decomposição térmica ou explosão
Regras básicas de segurança	Não superaqueça e não confine o Nitrato de Amônio.
Efeitos do produto	A inalação pode causar irritação do trato respiratório, com tosse, dor de garganta e dificuldade respiratória. O contato com o produto pode causar irritação na pele e nos olhos.
Efeitos adversos à saúde humana	Exposto a altas temperaturas, em decorrência da decomposição, pode liberar Amônia e gases Nitrosos tóxicos capazes de provocar problemas respiratórios agudos.
Efeitos ambientais	É muito solúvel em água, podendo contaminar cursos d'água, tornando-os impróprios para uso em qualquer finalidade.
Perigos físicos e químicos	O Nitrato de Amônio é um forte oxidante. A contaminação do Nitrato de Amônio pode promover a sua decomposição, tornando-o imprevisível e perigoso. Os contaminantes incluem matéria orgânica, Cloretos, Fluoretos e também alguns metais (exemplos: Cobre, Cromo, Zinco e outros).
Perigos específicos	Ignição ou detonação ao expor o produto ao calor e a materiais incompatíveis.

Fonte: Ultrafertil S.A. [29]

Alguns valores são expressos no sistema britânico, uma vez que as fórmulas originais foram desenvolvidas desta forma [8]. Ao final, os resultados serão transferidos para o sistema internacional.

Por esta razão a massa de estudo foi definida pela forma em que são comercializadas e pela quantidade encontrada nas ocorrências policiais em caixas eletrônicas, sendo:

- a) cartuchos de 1' x 8', com 118 g;
- b) cartuchos de 1' x 12', com 177g;
- c) cartuchos de 1' x 24', com 352g.

Inicialmente foram detonadas cargas explosivas para a definição de alcance de estilhaços; houve problemas quanto à mensuração de distâncias, pois foram misturados ao explosivo pó de giz, papel e massa de modelar. Os resultados para os dois materiais iniciais foram insatisfatórios, pois eram consumidos na explosão,

sobravam pequenos resíduos junto ao epicentro, mas o alcance máximo atingido era indefinido.

Como os cálculos são definidos para o explosivo TNT (Trinitrotolueno), há a necessidade de calcular o fator de efetividade relativa. O TNT é considerado a base, seu valor é 1, e da emulsão é 0,7; isto quer dizer que se obteve um resultado de um trabalho utilizando o TNT, para a realização deste trabalho e ter resultado aproximado, é preciso 30% a mais em massa de emulsão.

Desta forma, a carga explosiva com 118 g de emulsão equivalem a 0,26 lb, e $W = 0,26 \times 0,7 = 0,182$ (valor adimensional); ou seja, este valor é a equivalência de emulsão ao TNT.

Estabelecendo o fator $K=500$ para a distância de segurança máxima com a pressão de 0,07 psi, o cálculo da distância de segurança para os efeitos da pressão e para segurança contra projéteis leves seria:

$$d = K\sqrt[3]{W} \quad W = 0,182 \quad d = 500 \times \sqrt[3]{0,182} \quad d = 500 \times 0,57$$

$d = 285 \text{ ft ou } 86,8 \text{ m}$

Os cartuchos de 1' x 12', com 177g teriam os seguintes valores:

$$177\text{g} = 0,39 \text{ lb, e } 0,39 \times 0,7 = 0,273$$

$$d = K\sqrt[3]{W} \quad W = 0,273 \quad d = 500 \times \sqrt[3]{0,273} \quad d = 500 \times 0,648$$

$d = 324 \text{ ft ou } 98,75 \text{ m}$

Os cartuchos de 1' x 24', com 352g teriam os valores:

$$352\text{g} = 0,77 \text{ lb, e } 0,77 \times 0,7 = 0,539$$

$$d = K\sqrt[3]{W} \quad W = 0,539 \quad d = 500 \times \sqrt[3]{0,539} \quad d = 500 \times 0,814$$

$d = 407 \text{ ft ou } 124 \text{ m}$

As Tabelas 3 e 4 estabelecem distâncias e pelas quantidades de explosivos em estudo, a distância estabelecida seria de 900 ft ou 274,32 m. O intervalo para pequenas cargas é grande apresentando valores de distância genérica, ou seja, para 1 a 27 libras de explosivo e de 1 a 10 libras para bombas com carga explosiva,

a distância é definida para 900 ft ou 274,32 m; coincidentemente as cargas escolhidas para estudo se enquadram nesta faixa, razão pelo qual o resultado de distâncias é diferente.

Para a obtenção de dados, quanto à explosão, foi utilizado o programa *Blast/FX Explosive Effects Analysis Software* [30], modelo para determinar os efeitos da explosão contra instalações e as pessoas próximas; este modelo foi construído por *Northrop Grumman Mission Systems*, pertencente à *Federal Aviation Administration's (FAA)*.

O Departamento de Defesa estava interessado em criar um modelo para a Força Aérea dos Estados Unidos da América a fim de garantir a segurança das bases aéreas; posteriormente foi modificado e ampliado o seu uso, pois esta preocupação não seria apenas para os militares.

Desta forma foi inserida, inicialmente, a mesma massa de 118g, constante no cartucho de 1' x 8', no *Blast/FX*, apresentados na Figuras 17:

Figura 17 – Tela de configuração da massa explosiva

Observa-se na Figura 19 que o programa possibilita inserir uma denominação ao artefato, sendo definido como “pacote”; o tipo de explosivo

“*Ammonia Dynamite (20% strength)*”, similar ao explosivo estudado neste trabalho; a massa explosiva 0,26 lb ou 118 g. Ao inserir a massa, automaticamente o programa fornece a massa equivalente ao TNT, neste caso 0,18 lb ou 81,64 g de TNT; assim como possibilita também escolher a fragmentação, definida como “*standard*” ou “padrão”.

Ainda com relação à fragmentação o *Blast/FX* possibilita detalhá-la, mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Tela de configuração da fragmentação

Na Figura 18 observa-se o campo “*Container Weight*” (peso do recipiente) significando qual a massa atribuída ao recipiente ou invólucro do artefato, neste caso foi imposto a menor massa de recipiente, ou seja, 1 lb ou 453,6 g, para todas as massas definidas à emulsão explosiva em estudo. O programa não possibilita a inexistência de invólucro, pois dependendo da massa e espessura do recipiente haverá gasto de energia da explosão para romper o invólucro e consequentemente interferência no alcance da onda de choque.

Ainda neste campo foi selecionado no campo “*Fragment Velocity*” (velocidade do fragmento) o “*Auto-compute*” (cálculo automático) para facilitar os cálculos ao utilizar dados do próprio programa.

Além disso foi colocado o cursor no campo “Fragment size” (tamanho de fragmento), na extremidade “smaller” (menor), resultando informações sobre o número e tamanho dos fragmentos provenientes do invólucro, ou seja, 5000 fragmentos com massa mínima de 0,0002 lb ou 0,09 g e massa máxima de 0,0073 lb ou 3,3 g.

Outra condição inserida no programa foi que a explosão ocorrerá em área aberta a fim de que a onda de choque não sofra reflexão em obstáculos, interferindo na observação de alcance máximo da onda de choque.

O resultado do processamento dos dados são observados na Figura 19, foi definido o posicionamento de pessoas, representadas por triângulos, no ambiente; apesar das pessoas estarem alinhadas em coluna, o programa as considera independentes, caso contrário uma pessoa qualquer referenciada serviria como barreira protetora às pessoas posicionadas atrás.

Figura 19 – Tela de visualização de danos físicos e em pessoas.

As quadriculas de cor azul estão divididas em 10 ft², aproximadamente 1m²; o centro da área amarela é o epicentro da explosão.

Para as pessoas o programa estabelece cores para os danos definidas no campo “Legend” (legenda), e sub campo “*Casualty: Expected*” (Vítimas: Expectativa) da Figura 19, que percorrem de “None” (sem danos) na cor azul, “*Sligth*” (Leve) na cor azul clara, “*Serious*” (Sério) na cor amarela à “*Killed*” (morte) na cor vermelha.

Neste caso o programa forneceu a quantidade de estilhaços por polegadas quadradas que poderiam atingir a área escolhida, sendo 424,34 fragmentos a uma distância de 0,97 ft ou 29,6 cm do artefato explosivo.

A Figura 20 mostra dados de danos causados às pessoas, bem como de fragmentos atingidos em uma área escolhida, neste caso próximo ao epicentro, apontados pela seta vermelha.

Figura 20 – Dados sobre fragmentos e danos à 29,6 cm da explosão.

A pressão obtida à distância de 29,6 cm foi de 422,72 psi e com 424,34 fragmentos por área, e à medida que se afasta do artefato explosivo, a pressão diminui e consequentemente a quantidade de fragmentos, até a distância fornecida pelo programa de 285,05 ft ou 86,8 m, o qual não seria atingida por fragmentos que poderiam estar contaminados por algum radioisótopo, conforme Figura 21.

Figura 21 – Tela demonstrando a distância sem fragmentos.

Para a carga explosiva de 118 g o alcance de fragmentos lançados pela energia da explosão estaria limitada à distância de 86,8 m, igualando-se ao resultado obtido para o fator k igual a 500, observado na Tabela 8.

Após foi inserido no programa as massas explosivas de 177 g e 352 g obtendo os mesmos resultados demonstrado nas Figuras 19, 20 e 21, em razão das massas dos explosivos estarem próximas.

As informações das possibilidades de danos, fragmentos e distâncias foram coletadas e analisadas, conforme Figuras 22 e 23.

Facilmente é observado que conforme a distância do epicentro aumenta a possibilidade de danos e a concentração de fragmentos diminui, contudo à distância de 3 m, marcada com as linhas verdes, há uma queda acentuada do gráfico.

Figura 22 - Relação de Fragmentos com a distância

Figura 23 – Relação da possibilidade de danos com a distância

4. DISTRIBUIÇÃO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO IONIZANTE

Logo após a explosão a fonte deixou de ser puntiforme; sendo dispersa no ar e tornando-se uma pluma radioativa. A dose para indivíduos submersos não pode ser caracterizada por relações geométricas fixas como em fontes puntiformes. Neste caso não somente a exposição e contaminação externas são preocupações, mas também a ingestão e inalação de radionuclídeos causada pela passagem da pluma.

Durante a dispersão os radionuclídeos podem ser depositados no solo, dependendo de sua forma física, transferidos de volta à atmosfera pela ação do vento ou perturbação mecânica (ressuspensão), contudo o trabalho em questão trata apenas da exposição externa do corpo humano.

A CIPR e AIEA apresentaram um conceito para a avaliação das doses através da introdução de novas grandezas: dose efetiva para o corpo inteiro e dose equivalente comprometida nos próximos 50 anos para a contaminação interna com os radionuclídeos depositados em órgãos preferenciais e para trabalhadores.

No caso do público alcançam a idade de 70 anos e são estabelecidos os limites secundários: Limite de Incorporação Anual (LIA) para exposição interna, dose equivalente ambiente e dose equivalente direcional para a exposição externa. Existem ainda níveis de referência para a concentração de radionuclídeos no ar em Bq/m^3 [16, 31 e 32].

Nesta publicação é apresentada uma classificação para os efeitos induzidos pela radiação, que são os efeitos estocásticos e os efeitos determinísticos (atualmente chamados de reações no tecido).

O sistema de limitação de dose proposto pela publicação 103 da CIPR está baseado em três princípios básicos [15]:

- nenhuma prática deve ser adotada, a não ser que sua introdução traga mais benefícios do que malefícios;
- todas as exposições devem ser mantidas tão pequenas quanto razoavelmente exequíveis, considerando-se fatores econômicos e sociais; e
- a dose efetiva para os indivíduos não deve exceder os limites recomendados pela CIPR para as circunstâncias apropriadas.

Em 1979, a CIPR apresentou sua publicação 30 [33], abordando avaliações das doses de uma forma prática, com aplicação em dosimetria interna. Nela são

encontrados modelos dosimétricos para o sistema respiratório, sistema gastrointestinal, osso, e para a submersão em nuvens radioativas.

Para a determinação da taxa de dose para a submersão em uma pluma radioativa seguiremos a formulação apresentada pela publicação 30 da CIPR [33] que, para irradiação externa, será diretamente proporcional à concentração do radionuclídeo no ar e à sua energia.

A concentração de radionuclídeos ao nível do solo, a distâncias específicas, definidas a partir do ponto de liberação, vão depender da quantidade liberada, da altura de liberação, o ponto liberado, das condições meteorológicas locais, da quantidade de calor contida na liberação, da ocorrência de precipitação sobre o terreno, de propriedades químicas e físicas do material liberado, entre outros fatores.

Em proteção radiológica considera-se que partículas de pó com diâmetro aerodinâmico médio inferior a 0,3 μm se comportam como uma nuvem de vapor ou gás e portanto só fornecem ao indivíduo exposição externa. Aquelas partículas que possuem um diâmetro aerodinâmico médio entre 0,3 μm e 10 μm são respiráveis e portanto fornecem além de exposição externa a interna nos pulmões e demais órgãos de deposições que ocorrem no transporte sanguíneo. Partículas com diâmetro aerodinâmico médio acima de 10 μm não são considerados respiráveis, pois seriam retidos nos pêlos das narinas, supondo que o indivíduo não respire pela boca. Neste caso ocorreria simultaneamente uma contaminação da roupa e pele além da exposição externa [34].

Uma vez que a concentração é conhecida, a equação em termos de exposição externa do corpo é:

$$\dot{E} = C s k g / \rho$$

onde:

E = a taxa de dose efetiva para os tecidos externos (Sv / h)

C = concentração do radionuclídeo no ar em (Bq/m^3)

s = a taxa de dose equivalente em um pequeno elemento do meio se uniformemente contaminado com uma concentração de 1 Bq/g ($\text{Sv}\cdot\text{g}/\text{Bq}\cdot\text{hr}$)

k = razão do poder de freamento da massa radioativa no tecido e o poder de freamento do ar

g = fator geométrico que representa a fração da radiação emitida que é absorvida no tecido

ρ = densidade do tecido (g/m^3)

O fator g é 0 (zero) para partículas alfa e partículas beta emitidas por Trítio (ou qualquer radiação beta de pequena energia que não pode penetrar na camada de epiderme da pele); 0,5 para outras radiações beta ou fótons de pequenas energias.

4.1 Dispersão dos radionuclídeos pela explosão

No contexto de ainda estabelecer parâmetros iniciais usou-se o programa *The HotSpot Health Physics Codes - Version 2.07.2* [35], ou programa *HotSpot*, que oferece uma aproximação dos efeitos da radiação associada com a liberação atmosférica de materiais radioativos.

O programa foi criado em 1988 pelo Laboratório Nacional Americano *Lawrence Livermore* sob a fiscalização do Departamento de Energia dos Estados Unidos, sendo atualizado desde então; conforme o manual do programa os resultados apresentados são pouco menores comparados às doses reais de radiação.

O objetivo é fornecer aos profissionais de análises de riscos e resposta a emergências uma análise rápida sobre avaliações de acidentes envolvendo material radioativo.

O programa utiliza as metodologias recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR), possibilitando a seleção dos modelos da Publicação 30, a série de publicações 60/70 e o modelo de pulmão da Publicação 66, além de definir o Diâmetro Aerodinâmico Médio de Atividade (DAMA) em 1μ . Possibilita ainda o uso das unidades clássicas (REM, rad e curie) e o Sistema Internacional (Sv, Gy e Bq).

A tela principal de interface do usuário é mostrada na Figura 24, com a seleção dos Modelos de Dispersão Atmosférica em “*General Explosion*” ou Explosão Geral.

Figura 24 – Tela principal do programa *Hot Spot*

A inserção de dados iniciou-se pelo ^{60}Co , visualizado na Figura 25.

Figura 25 – Tela das informações para o ^{60}Co

A Figura 25 mostra informações importantes, no campo para a definição do radionuclídeo foi escolhido para o ^{60}Co a classe de inalação “F” (*fast* ou rápido), ou seja, a permanência na região pulmonar é rápida, o ar contaminado é inspirado e expirado de maneira rápida.

O Campo, da Figura 25, “*Material at risk* ou material em risco” é a Atividade (A) do radionuclídeo envolvido, neste caso foi definida a Atividade de $1,5 \cdot 10^2$ TBq, como Atividades típicas de fontes utilizadas em radioterapia [36].

Finalizando no campo “*High Explosive* ou alto explosivo” definiram-se os valores em libras do explosivo emulsão, lembrando que os valores expressos são as equivalências do TNT, conforme os valores estudados no subtítulo 3.2.3, ou seja: 0,182 lb ; 0,273 lb e 0,539 lb, ou respectivamente 82,5 g; 123,8 g e 244,5 g.

O programa impõe que seja definida a condição climática do cenário em estudo, apesar deste trabalho analisar apenas a dispersão ocasionada pela explosão, não incluindo condições dos ventos, foram estipulados valores mínimos tendendo a um clima de calmaria, verificado na Figura 26.

HotSpot Version 2.07.2 sábado, abril 14, 2012

File Help

Models Source Term **Meteorology** Receptors Setup Output

10-meter Wind Speed: 0.10 m/s

Selected Stability Class: D

Display Wind Chart: ☐

Wind Direction: 270

Wind from the West

Atmospheric Stability

Enter Solar Information - or- Enter the Actual Stability

☐ Sun High in the sky
☐ Sun Low in the sky or cloudy
☐ Night

☐ A - Very unstable
☐ B - Moderately unstable
☐ C - Slightly unstable
☒ D - Neutral
☐ E - Slightly stable
☐ F - Moderately stable
☐ G - Special nighttime (low wind)

Figura 26 – Tela de condições meteorológicas

No campo “*meter Wind Speed* ou velocidade do vento em metros” definiu-se o menor valor possível do programa, ou seja 0,10 m/s, com a direção partindo pelo leste, definido pelo valor 270° no campo “*Wind Direction* ou direção do vento” e na mesma condição foi escolhida a classe de estabilidade “D”, correspondendo a estabilidade climática neutra.

O resultado da dispersão da contaminação é demonstrado na Figura 27.

Figura 27 – Contaminação para o ^{60}Co com a carga explosiva de 82,5g

A Figura 27 mostra a área atingida pela contaminação após a explosão, verifica-se que à direita do epicentro há um alongamento na imagem da área, isso é decorrente da direção do vento definida na Figura 26.

Abaixo da mesma figura são definidas regiões com cores e os valores são atribuídos conforme Tabela 7, com os limites de doses anuais para o cristalino (15 mSv) e para exposição externa (50 mSv), sendo:

- **Inner ou interior:** 1Sv na área de 4.000 m²;
- **Middle ou meio:** 0,05 Sv na área de 310.000 m²;
- **Outer ou exterior:** 0,015 Sv na área de 1.000.000 m².

Verifica-se que em uma área de 4.000 m² haverá uma dose preocupante, pois, como visto nos efeitos biológicos da radiação, os órgãos mais sensíveis para os efeitos que provocam reações no tecido são os órgãos hematopoéticos, com uma dose limiar de 1 Sv, as enfermidades provocadas são leucopenia e a anemia.

Estudando apenas a área vermelha, temos:

Área: 4000 m²

$$A = \pi r^2 \quad 4000 = \pi r^2 \quad r = 35,7 \text{ m}$$

Calculando a taxa de dose para a Atividade de $1,5 \cdot 10^2$ TBq; na distância limite do raio de 35,7 m resultará a taxa de dose de 32 mSv/h, que excede em demasia os limites anuais.

Para a massa de 0,273 lb ou 123,8 g de explosivo, mantendo as demais configurações estabelecidas demonstradas nas Figuras 24, 25 e 26 obteve-se os resultados apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Contaminação para o ^{60}Co com a carga explosiva de 123,8g

Ocorreram poucas mudanças em decorrência à pequena variação de massa explosiva entre os casos, o valor do raio neste caso foi de 31 m onde haverá a situação mais grave de contaminação.

- **Inner ou interior:** 1Sv na área de 3.000 m²;
- **Middle ou meio:** 0,05 Sv na área de 310.000 m²;
- **Outer ou exterior:** 0,015 Sv na área de 1.100.000 m².

Calculando a taxa de dose para a Atividade de $1,5 \cdot 10^2$ TBq; na distância limite do raio de 31 m resultará a taxa de dose de 43,13 mSv/h, ultrapassando também os limites anuais.

Para a massa de 0,539 lb ou 244,5 g de explosivo, mantendo as demais configurações estabelecidas demonstradas nas Figuras 24, 25 e 26 obteve-se os resultados apresentados na Figura 29:

Figura 29 - Contaminação para o ^{60}Co com a carga explosiva de 244,5g

Houve alteração somente na área vermelha; o valor do raio neste caso foi de 25,2 m onde haverá a situação mais grave de contaminação.

- **Inner ou interior:** 1Sv na área de 2.000 m²;
- **Middle ou meio:** 0,05 Sv na área de 310.000 m²;
- **Outer ou exterior:** 0,015 Sv na área de 1.100.000 m².

Calculando a taxa de dose para a Atividade de $1,5 \cdot 10^2$ TBq; na distância limite do raio de 25,2 m resultará a taxa de dose de 66,6 mSv/h, ultrapassando também os limites anuais.

Observa-se que com o aumento da massa explosiva há uma diminuição da área vermelha e conseqüentemente um aumento na taxa de dose.

Para o ^{131}I a inserção de dados iniciais são demonstradas na Figura 30.

The screenshot shows a software interface with the following data:

Parameter	Value
Radionuclide	I-131 F 8.04d
Material-at-Risk (MAR)	3,7000E+09 Bq
Damage Ratio (DR)	1,000
Leakpath Factor (LPF)	1,000
High Explosive	1,82E-01 lb
Deposition Velocity	0,30 cm/sec
Airborne Fraction (ARF)	1,00E+00
Respirable Fraction (RF)	1,00E+00

Figura 30 - Tela das informações para o ^{131}I

Para o ^{131}I foi definida a Atividade de $3,7 \cdot 10^{-3}$ TBq, como Atividade típica de fontes não seladas para uso na medicina [37].

Os resultados para os valores de massa explosiva: 0,182 lb ; 0,273 lb e 0,539 lb, ou respectivamente 82,5 g; 123,8 g e 244,5 g; mantendo as demais configurações estabelecidas mostradas nas Figuras 24, 25 e 26 obteve-se os resultados iniciando-se pela Figura 31.

Figura 31 - Contaminação para o ^{131}I com a carga explosiva de 82,5g

Abaixo da mesma figura são definidas regiões com cores e para os valores não foi possível atribuir parâmetros dos limites anuais, pois o programa não os aceitou, informando que para aqueles mesmos valores atribuídos não haveria como definir as regiões coloridas; assim o programa gerou valores automáticos, a saber:

- **Inner ou interior:** 0,1 mSv na área de 300 m²;
- **Middle ou meio:** 0,01 mSv na área de 35.000 m²;
- **Outer ou exterior:** 0,001 mSv na área de 510.000 m².

Estudando apenas a área vermelha, temos:

Área: 300 m²

$$A = \pi r^2 \quad 300 = \pi r^2 \quad r = 9,77 \text{ m}$$

Calculando a taxa de dose para a Atividade de $3,7 \cdot 10^{-3}$ TBq, na distância limite do raio de 9,77 m resultará a taxa de dose de 0,001809 mSv/h, não sendo preocupante, que para atingir o limite anual de 50 mSv uma pessoa teria que permanecer nesta área por 3,15 anos.

A Figura 32 mostra a distribuição da contaminação para a massa explosiva de 123,8 g.

Figura 32 – Contaminação para o ^{131}I com a carga explosiva de 123,8g

O valor do raio neste caso foi de 99,3 m onde haverá a situação mais grave de contaminação, os dados atribuídos pelo programa são:

- **Inner ou interior:** 0,01 mSv na área de 31.000 m²;
- **Middle ou meio:** 0,001 mSv na área de 520.000 m²;
- **Outer ou exterior:** 0,0001 mSv na área de 4.100.000 m².

Calculando a taxa de dose para a Atividade de $3,7 \cdot 10^{-3}$ TBq, na distância limite do raio de 99,3 m resultará a taxa de dose de $1,25 \cdot 10^{-5}$ mSv/h, não sendo preocupante.

Para a massa explosiva 244,5 g o resultado é mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Contaminação para o ^{131}I com a carga explosiva de 244,5 g

O valor do raio neste caso foi de 87,4 m onde haverá a situação mais grave de contaminação, os dados atribuídos pelo programa são:

- **Inner ou interior:** 0,01 mSv na área de 24.000 m²;
- **Middle ou meio:** 0,001 mSv na área de 520.000 m²;
- **Outer ou exterior:** 0,0001 mSv na área de 4.400.000 m².

Calculando a taxa de dose para a Atividade de $3,7 \cdot 10^{-3}$ TBq, na distância limite do raio de 87,4 m resultará a taxa de dose de $1,69 \cdot 10^{-5}$ mSv/h, não sendo preocupante.

Observa-se que com a carga explosiva de 244,5 g houve uma diminuição da área comparada à carga explosiva de 123,8 g, provavelmente em virtude da elevada energia da onda negativa, transportando os fragmentos mais próximos ao epicentro.

Para o ^{192}Ir foi definida a Atividade de 3,7 TBq, como Atividade típica de fontes para radiografia industrial [38].

Os resultados para os valores de massa explosiva: 0,182 lb ; 0,273 lb e 0,539 lb, ou respectivamente 82,5 g, 123,8 g e 244,5 g, mantendo as demais configurações estabelecidas e mostradas nas Figuras 24, 25 e 26, são apresentadas na Figura 34.

File Help

Models **Source Term** Meteorology Receptors Setup Output

Model **General Explosion**

Radionuclide: Ir-192 F 74.02d

Material-at-Risk (MAP): 3,7000E+12 Bq

Damage Ratio (DR): 1,000

Leakpath Factor (LPF): 1,000

High Explosive: 1,82E-01 lb

Deposition Velocity: 0,30 cm/sec

Airborne Fraction (ARF): 1,00E+00

Respirable Fraction (RF): 1,00E+00

Figura 34 - Tela das informações para o ^{192}Ir

Para a carga de 82,5 g foram obtidos os resultados mostrados na Figura 35.

Figura 35 - Contaminação para o ^{192}Ir com a carga explosiva de 118g

Para a Atividade estudada para o ^{192}Ir , o programa forneceu somente a dose estabelecida de 15 mSv, para os parâmetros de 1 Sv e 50 mSv não houve a definição de áreas, sendo:

- **Outer ou exterior:** 15 mSv na área de 1.000 m².

Estudando a área, temos:

Área: 1000 m²

$$A = \pi r^2 \quad 1000 = \pi r^2 \quad r = 17,84 \text{ m}$$

Calculando a taxa de dose para a Atividade de 3,7 TBq, na distância limite do raio de 17,84 m resultará a taxa de dose de 1,23 mSv/h, sendo uma taxa de dose preocupante; para atingir o limite anual de 50 mSv basta que uma pessoa permaneça nesta distância por 40,65 horas.

Para a carga de 123,8g obteve-se os resultados mostrados na Figura 36.

Figura 36 - Contaminação para o ^{192}Ir com a carga explosiva de 123,8g

Os dados fornecidos são:

- **Outer ou exterior:** 15 mSv na área de 700 m².

Neste caso o raio foi de 14,92 m e calculando a taxa de dose para a Atividade de 3,7 TBq; na distância limite do raio de 14,92 m resultará a taxa de dose de 1,78 mSv/h, sendo uma taxa de dose preocupante; para atingir o limite anual de 50 mSv basta que uma pessoa permaneça nesta distância por 28 horas.

Para a carga de 244,5g obteve-se os resultados mostrados na Figura 37

Figura 37 - Contaminação para o ^{192}Ir com a carga explosiva de 244,5g

Os dados fornecidos são:

- **Outer ou exterior:** 15 mSv na área de 400 m².

Neste caso o raio foi de 11,28 m e calculando a taxa de dose para a Atividade de 3,7 TBq; na distância limite do raio de 11,28 m resultará na taxa de dose de 3,16 mSv/h, sendo uma taxa de dose preocupante; para atingir o limite anual de 50 mSv basta que uma pessoa permaneça nesta distância por 15,8 horas.

No caso do ^{192}Ir , conforme se aumentou a carga explosiva houve uma diminuição da área de alcance e consequentemente aumento da taxa de dose.

4.2 Cálculos da dose efetiva

Antes de calcular a dose efetiva é necessário conhecer a concentração de radionuclídeo na região em estudo.

O volume de uma esfera é dado por:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Sendo:

V = volume, e

r = raio da esfera.

Como os efeitos da explosão se propagam em todas as direções, as ondas de choque direcionadas ao solo são refletidas a outras direções e a fim de facilitar os cálculos, entenda-se que a pluma radioativa no momento da explosão terá o formato de uma semi-esfera, resultando assim:

$$V' = \frac{4/3 \pi r^3}{2}$$

A fim de interligar os resultados dos programas, a distância mínima sem a presença de fragmentos apresentados pelo programa *Blast Fx*, descrita na Figura 23, é de 86,8 m, logo:

$$V' = \frac{4/3 \pi r^3}{2} \quad V' = \frac{4/3 \pi 86,8^3}{2} \quad V' = 1369675,8 \text{ m}^3$$

Como a concentração de radionuclídeo é expresso por Bq/m³ e as Atividades dos radioisótopos em estudo são:

- $^{60}\text{Co} = 1,5 \cdot 10^2 \text{ TBq}$;
- $^{131}\text{I} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ TBq}$;
- $^{192}\text{Ir} = 3,7 \text{ TBq}$.

Temos:

Concentração dos radionuclídeos:

- $C(^{60}\text{Co}) = 1,5 \cdot 10^{14} / 1369675,8 = 109.514.967 \text{ Bq/m}^3$;
- $C(^{131}\text{I}) = 3,7 \cdot 10^9 / 1369675,8 = 2701 \text{ Bq/m}^3$;
- $C(^{192}\text{Ir}) = 3,7 \cdot 10^{12} / 1369675,8 = 2.701.369,2 \text{ Bq/m}^3$;

Na distância de 3 m há a diminuição significativa de fragmentos, conforme mostrado no Gráfico 1, logo:

$$V' = \frac{4/3 \pi r^3}{2} \quad V' = \frac{4/3 \pi 3^3}{2} \quad V' = 56,55 \text{ m}^3$$

A concentração dos radionuclídeos nesta condição será:

- $C(^{60}\text{Co}) = 1,5 \cdot 10^{14} / 56,55 = 2,65 \times 10^{12} \text{ Bq/m}^3$;
- $C(^{131}\text{I}) = 3,7 \cdot 10^9 / 56,55 = 65428824 \text{ Bq/m}^3$;
- $C(^{192}\text{Ir}) = 3,7 \cdot 10^{12} / 56,55 = 65428824049,5 \text{ Bq/m}^3$;

Conhecida a concentração aplica-se a equação para definir a irradiação externa do corpo:

$$\dot{E} = C s k g / \rho$$

onde:

E = a taxa de dose efetiva para os tecidos externos (Sv / h)

C = concentração do radionuclídeo (Bq/m³)

s = a taxa de dose equivalente em um pequeno elemento do meio se uniformemente contaminado com uma concentração de 1 Bq/g (Sv-g/Bq-hr)

k = razão do poder de freamento da massa radioativa no tecido e o poder de freamento do ar

g = fator geométrico que representa a fração da radiação emitida que é absorvida no tecido

ρ = densidade do tecido (g/m³)

O fator g é 0 (zero) para partículas alfa e partículas beta emitidas por Trítio (ou qualquer radiação beta de pequena energia que não pode penetrar a camada de epiderme da pele); 0,5 para outras radiações beta ou fótons de pequena energia.

Assim para as concentrações de radionuclídeo para o raio de 86,8m temos:

- $C(^{60}\text{Co}) = 1,5 \cdot 10^2 \text{ TBq} / 1369675,8 = 109.514.967 \text{ Bq/m}^3$;

Taxa de dose = 4,54 mSv/h

k=1,3

g=0,5

$\rho = 1300 \text{ g/m}^3$

$$\dot{E} = C s k g / \rho \quad \dot{E} = 109514967 \cdot 4,54 \cdot 1,3 \cdot 0,5 / 1300$$

$$\dot{E} = 248599 \text{ Sv/h}$$

- $^{131}\text{I} = 3,7 \cdot 10^9 / 1369675,8 = 2701 \text{ Bq/m}^3$;

$$\text{Taxa de dose} = 1,714 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/h}$$

$$k=1,3$$

$$g=0,5$$

$$\rho = 1300 \text{ g/m}^3$$

$$\dot{E} = Cskg/\rho \quad \dot{E} = 2701 \cdot 1,714 \cdot 10^{-5} \cdot 1,3 \cdot 0,5/1300$$

$$\dot{E} = 2,31 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/h}$$

- $^{192}\text{Ir} = 3,7 \cdot 10^{12} / 56,55 = 65428824049,5 \text{ Bq/m}^3$;

$$\text{Taxa de dose} = 1,6264 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/h}$$

$$k=1,3$$

$$g=0,5$$

$$\rho = 1300 \text{ g/m}^3$$

$$\dot{E} = Cskg/\rho \quad \dot{E} = 65428824049,5 \cdot 1,6264 \cdot 10^{-6} \cdot 1,3 \cdot 0,5/1300$$

$$\dot{E} = 53,20 \text{ Sv/h}$$

As concentrações de radionuclídeo para o raio de 3 m são:

- $^{60}\text{Co} = 1,5 \cdot 10^2 \text{ TBq} / 56,55 = 2,6525 \cdot 10^{12} \text{ Bq/m}^3$;

$$\text{Taxa de dose} = 5,07 \text{ Sv/h}$$

$$k=1,3$$

$$g=0,5$$

$$\rho = 1300 \text{ g/m}^3$$

$$\dot{E} = Cskg/\rho \quad \dot{E} = 2,6525 \cdot 10^{12} \cdot 5,07 \cdot 1,3 \cdot 0,5/1300$$

$$\dot{E} = 6.724.087.500 \text{ Sv/h}$$

- $^{131}\text{I} = 3,7 \cdot 10^9 / 1369675,8 = 2701 \text{ Bq/m}^3$;

$$\text{Taxa de dose} = 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/h}$$

$$k=1,3$$

$$g=0,5$$

$$\rho = 1300 \text{ g/m}^3$$

$$\dot{E} = Cskg/\rho \quad \dot{E} = 2701 \cdot 1,96 \cdot 10^{-5} \cdot 1,3 \cdot 0,5 / 1300$$

$$\dot{E} = 2,64 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/h}$$

- $^{192}\text{Ir} = 3,7 \cdot 10^{12} / 56,55 = 65428824049,5 \text{ Bq/m}^3$;

$$\text{Taxa de dose} = 0,046 \text{ Sv/h}$$

$$k=1,3$$

$$g=0,5$$

$$\rho = 1300 \text{ g/m}^3$$

$$\dot{E} = Cskg/\rho \quad \dot{E} = 65428824049,5 \cdot 0,046 \cdot 1,3 \cdot 0,5 / 1300$$

$$\dot{E} = 1504862,9 \text{ Sv/h}$$

Os cálculos de taxa de dose e dose efetiva, para os parâmetros estabelecidos neste estudo, são mais preocupantes para o ^{60}Co e para o ^{192}Ir .

Pelo programa *Blast FX* [37], conforme Figuras 22 e 23, o limite da distância que possui a maior concentração de fragmentos e possibilidade de danos é de 3 metros e a distância mínima que não há o alcance de fragmentos é de 86,8 metros.

Assim, os valores de taxa efetiva de dose, após a explosão de um DDR, poderiam ser posicionados em uma figuração, conforme Figura 38 e Tabela 10, da seguinte forma:

Figura 38 - Definição das áreas sob os efeitos da radiação e explosão.

Tabela 10 - Definição da área e efeitos predominantes de uma bomba suja

Área	Efeitos predominantes <u>durante a explosão</u> .
Vermelha	Pressão e calor.
Amarela	Pressão, calor e radiação.
Verde	Radiação.

A região vermelha é aquela à qual prevalecem os efeitos da pressão e calor, e **durante a explosão**, nesta região, não há preocupação com a radiação, pois os efeitos mencionados são os grandes responsáveis pelos danos ocorridos.

No caso de presença de pessoas na região vermelha, elas sofreriam toda a ação dos efeitos do explosivo ocorrendo a morte; logo, nesta fase, a ação da radiação não é importante, contudo após a cessação destes efeitos a radiação deve ser considerada, principalmente para os procedimentos de descontaminação.

Na região amarela há que se observar ambos os efeitos, da explosão e da radiação, o efeito da explosão é menor que na região vermelha, contudo, nesta região a ação da radiação se faz presente e com grande concentração de partículas contaminadas com material radioativo.

A região verde seria aquela na qual inexistente a ação direta da explosão e o aparecimento de material radioativo se faz presente por meio de transporte por condições climáticas, vento, chuva, e por outros meios como calçados, veículos, etc.

É importante ressaltar que as características das regiões descritas ocorrem durante a existência da reação química do explosivo; após isso, no epicentro o efeito da radiação se faz presente até mesmo pelo retorno de partículas transportadas pelos efeitos da onda negativa (ocupação do vácuo pelo ar atmosférico, provocada pela onda de expansão ou onda positiva).

5. CONCLUSÃO

A finalidade deste trabalho foi analisar as consequências resultantes de artefatos explosivos contendo radioisótopos e isto foi conseguido considerando uma nuvem gasosa que só produzisse exposição externa. Os demais tipos de exposição que poderiam ocorrer foram deixados para futuros trabalhos.

Durante o desenvolvimento dos trabalhos verificou-se que o assunto “bomba suja” é muito explorado, mas a principal dificuldade encontrada foi que muitos textos produzidos não abordam este evento de forma científica; em geral são trabalhos que exploram quais procedimentos devem ser adotados para remediar os danos causados por este tipo de artefato.

O estudo separado do alcance do efeito da onda de choque do explosivo pelos cálculos e também dos valores resultantes do programa *Blast FX*, e posteriormente dos resultados no *Hot Spot* comprovam que nas proximidades do epicentro realmente as condições de taxa de dose são preocupantes, contudo quando o programa *Hot Spot* apresenta resultados a longas distâncias da ordem de quilômetros para as quantidades de material radioativo usado, eles parecem exagerados e não confiáveis. Seria importante efetuar um estudo real para formalizar um programa computacional a longas distâncias confiável.

Este estudo é importante, pois os resultados não confiáveis podem causar efeitos adversos quanto às posturas operacionais na gestão deste evento; o impacto negativo que pode trazer ao poder constituído pela má condução poderia tornar-se irreparável.

6. TRABALHOS FUTUROS

1. Estudo da taxa de dose dos pulmões ocasionada pela inalação da pluma radioativa.
2. Repetir este trabalho com valores máximos e mínimos de atividade possível de ser utilizada no explosivo em vez de fontes típicas usadas na prática como foi considerado neste trabalho.
3. Considerar a existência de estilhaços e determinar a distribuição do diâmetro aerodinâmico médio de atividade. Neste caso repetir o trabalho por nós realizado considerando uma distribuição volumétrica da atividade e uma distribuição superficial sobre o estilhaço.
4. Efetuar um estudo dos procedimentos de descontaminação tanto do ambiente como de vestimentas e iniciais das pessoas. Para tanto, os relatórios do OIEA sobre os acidentes ocorridos em Goiânia [39], El Salvador [40], etc podem ser referências primordiais.
5. Efetuar um estudo análogo com os demais radioisótopos mais frequentemente utilizados na indústria e na medicina.
6. Desenvolver um estudo real para formalizar um programa computacional para análises de alcance da pluma radioativa para longas distâncias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] WRIGHT, L. **O vulto das torres, A Al-Qaeda e o Caminho até o 11/9**. São Paulo: Companhia das Letras, 2006.

[2] http://www.istoe.com.br/reportagens/27611_O+DIA+DA+INFAMIA - revista ISTOÉ edição 1797, acessado em 05 de março de 2012.

[3] http://veja.abril.com.br/130705/p_082.html , acessado em 05 de março de 2012.

[4] Jornal O GLOBO de 23/05/2006 - Editoria: Segundo Caderno; pg 8, Coluna: Arnaldo Jabor.

[5] http://www.istoe.com.br/reportagens/21854_O+CONTRABANDO+DO+URANIO+BRASILEIRO , acessado em 5 de março de 2012.

[6] POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IP-1-PM - Instrução Provisória de Atendimento de Ocorrências Envolvendo Artefatos Explosivos ou Bombas**. Anexo ao Boletim Geral PM nº 173 de 05 de setembro de 1996 e alterada pela publicação inserta no Boletim Geral PM nº 158 de 20 de agosto de 1997. São Paulo, 1997.

[7] STETTBACHER, A. **Polvoras y Explosivos, Elementos de desintegración atômica y fenómenos de su descarga**. Buenos Aires: G. Gili. S.A.

[8] O'CONNOR J., C. **Tactical Explosive Breaching Operations**. NWTC Publishing. Issaquah, 2001.

[9] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR E UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Apostila de Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. 3 ed. 2010.

[10] TAUHATA, L.; SALATI P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. - **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Rio de Janeiro, 2003, p. 16 - 203.

[11] EVANS, R. D. - **The Atomic Nucleus** – Krieger Publishing Company, Flórida, 1985, p. 565.

[12] EVANS, R. D. - **The Atomic Nucleus** – Krieger Publishing Company, Flórida, 1985, p. 218 e 219.

[13] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. 2005.

[14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – **Health Effects and Medical Surveillance** – Pratical Radiation Technical Manual. Vienna, 2004.

[15] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION ***The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***. (ICRP 103). Alemanha, 2007.

[16] INTERNATIONAL COMMISSION RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, **Fundamental Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry** – ICRU Report 51, Maryland, September 1993.

[17] ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Cobalt**. Human Health Fact Sheet, EVS, Chicago, 2005.

[18] DURAN, E. **Biofísica Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Pearsom Prentice Hall, 2003.

[19] http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Kobalt_electrolytic_and_1cm³_cube.jpg - acesso em: 08 de setembro de 2011.

[20] http://www.hc.unicamp.br/imprensa/banco_img/coba3.html - acesso em: 08 de setembro de 2011.

[21] http://www.tabela.oxigenio.com/metais_de_transicao/elemento_quimico_cobalto.htm - acesso em: 17 de maio de 2011.

[22] ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Iodine**. Human Health Fact Sheet, EVS, Chicago, 2005.

[23] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Iodo> - acesso em: 08 de setembro de 2011.

[24] ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Iridium**. Human Health Fact Sheet, EVS, Chicago, 2005.

[25] <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/elementos%20nativos/iridio.gif> - acesso em: 08 de setembro de 2011.

[26] ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Radiological Dispersal Device (RDD)**. Human Health Fact Sheet, EVS, Chicago, 2005.

[27] BARROSO, D. E. G. **A Física dos Explosivos**. Editora Livraria da Física, São Paulo, p. 2009.

[28] ROCHEDO, E. R. R. **Modelo para Avaliação da Exposição Radiológica em um Ambiente Urbano Após uma Contaminação Radioativa**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - IBCCF, Rio de Janeiro, 1994.

[29] ULTRAFERTIL S.A. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) número 07**, Rio de Janeiro, Data da última revisão: 24 de fevereiro de 2011.

[30] NORTHROP GRUMMAN MISSION SYSTEMS, **Blast/Fx Explosive Effects Analysis** - 12011 Sunset Hills Road Reston, Virginia, 2003.

[31] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, **Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation** – ICRU Report 60. Maryland, dezembro 1998.

[32] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION **A Compilation of the Major Concepts and Quantities in use by ICRP**. Publication 42. Oxford, 1984.

[33] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION **Limits for intakes of radionuclides by workers**. Oxford, 1979. (ICRP-30, part 1).

[34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Safety Standards **Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards Part 3 No. GSR Part 3**. Vienna, 2011.

[35] NATIONAL ATMOSPHERIC RELEASE ADVISORY CENTER, **Hotspot Health Physics Codes** Version 2.07.2 - Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, 2011.

[36] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA **Clasificación de las fuentes radiactivas - Normas de Seguridad del OIEA Nº RS-G-1.9**. Viena, 2009, p. 14. (STI/pub/1227, ISBN 978-92-0-301409-0).

[37] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA **Clasificación de las fuentes radiactivas - Normas de Seguridad del OIEA Nº RS-G-1.9**. Viena, 2009, p. 26. (STI/pub/1227, ISBN 978-92-0-301409-0).

[38] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA **Clasificación de las fuentes radiactivas - Normas de Seguridad del OIEA Nº RS-G-1.9**. Viena, 2009, p. 16. (STI/pub/1227, ISBN 978-92-0-301409-0).

[39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN GOIANIA**. Vienna, 1988 ISBN 92-0-129088-8.

[40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN SAN SALVADOR**. Vienna, 1990. ISBN 92-0-129090-X.