

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

ÉERICA NASCIMENTO DOMINGOS

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO EM DEPÓSITO DE REJEITOS RADIOATIVOS E O
RISCO RADIOLÓGICO ASSOCIADO A ESSE CENÁRIO**

RIO DE JANEIRO

2018

ÉRICA NASCIMENTO DOMINGOS

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO EM DEPÓSITO DE REJEITOS RADIOATIVOS E O
RISCO RADIOLÓGICO ASSOCIADO A ESSE CENÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia
Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de
Mestra em Ciência e Tecnologia Nucleares.

Orientador: Prof. Dr. Zelmo Rodrigues de Lima

Orientadora: Dr^a. Laís Alencar de Aguiar

Rio de Janeiro

2018

DOMI Domingos, Érica Nascimento.

Simulação de incêndio em depósito de rejeitos radioativos e o risco associado a esse cenário / Érica Nascimento Domingos – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2018.

89f.

Orientadores: Zelmo Rodrigues de Lima e Laís Alencar de Aguiar

Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia Nucleares) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2018.

1. Análise de Risco.
2. Simulação de Incêndio.
3. Depósito de Rejeitos.
4. Risco Radiológico.

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO EM DEPÓSITO DE REJEITOS RADIOATIVOS E O
RISCO RADIOLÓGICO ASSOCIADO A ESSE CENÁRIO**

Érica Nascimento Domingos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM CIÊNCIA EM
TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

Prof. Zelmo Rodrigues de Lima

Prof.^a Laís Alencar de Aguiar

Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho

Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais Regina e José Carlos, por me proporcionar condições para desenvolver meus estudos.

À minha irmã Michele por todo carinho e apoio incondicional.

Aos Tios Leci e Ana por todo incentivo.

As minhas amigas Juliane e Thamara, por tornarem essa caminhada mais alegre.

Ao meu namorado Eduardo pela compreensão e pelos sorrisos que me tornaram feliz mesmo nos momentos mais adversos.

Aos meus orientadores pelas críticas construtivas e por compartilhar seus conhecimentos, em especial ao Prof. Dr. Zelmo por toda dedicação e suporte.

À Senhora Cláudia da secretaria PPGIEN pela atenção e disponibilidade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação profissional, o meu muito obrigada.

Por último, agradeço a CNEN pela bolsa concedida cuja qual me possibilitou realizar o curso.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”. (Leonardo da Vinci)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.1 Objetivo Específico	16
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 GRANDEZAS RADIOLÓGICAS	20
2.1.1 Constante de decaimento	20
2.1.2 Atividade	20
2.2 RADIAÇÃO IONIZANTE	21
2.2.1 Efeitos biológicos da radiação ionizante	22
2.2.1.1 Efeitos estocásticos.....	22
2.2.2.2 Efeitos determinísticos	23
2.3 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	23
2.3.1 Princípios da proteção radiológica	23
2.3.2 Grandezas de radioproteção	24
2.3.2.1 Dose absorvida	24
2.3.2.2 Dose Equivalente	25
2.3.2.3 Dose equivalente em um órgão ou tecido (H_T)	26
2.3.2.4 Dose efetiva (E).....	27
2.3.2.5 Limite de dose individual	28
2.3.3 Situações de emergência radiológica	29
2.4 AVALIAÇÃO DE RISCO	30
2.4.1 Risco de câncer induzido por radiação ionizante	30
2.4.1.1 Estudo Coorte	31
2.5 REJEITOS RADIOATIVOS	32

2.5.1 Classificação dos rejeitos radioativos	32
2.5.2 Métodos de dispensa ou deposição	34
2.5.3 Gerência de rejeitos radioativos	35
2.5.4 Depósito de rejeitos radioativos	35
2.5.4.1 Licenciamento	37
2.5.4.2 Inventário	38
2.6 INCÊNDIO	38
2.6.1 Casos de incêndio em depósito de rejeitos radioativos.....	40
2.6.2 Extinção do incêndio	41
2.6.2 Segurança contra incêndios	43
2.6.3 Proteção contra incêndio em instalações nucleares.....	43
2.6.1.1 Critérios de proteção em profundidade	45
2.7 MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA.....	46
3 METODOLOGIA.....	48
3.1 ESTUDO DE CASO	48
3.2 SOFTWARE HOTSPOT.....	50
3.2.1 Classificação de estabilidade atmosférica	52
3.3 MODELO BEIR V	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 SIMULAÇÃO DO INCÊNDIO NO HOTSPOT.....	57
4.1.2 Curvas de Isodoses	57
4.1.3 Linha de centro da pluma	66
4.2 CÁLCULO DO RISCO RADIOLÓGICO	74
5 CONCLUSÃO.....	83
6. REFERÊNCIAS	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Repositório próximo a superfície para rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação.....	34
Figura 2: Depósito Inicial CNAAA.....	36
Figura 3: Depósito final localizado no CRCN-CO em Abadia de Goiás.....	37
Figura 4: Incêndio no depósito de rejeitos radioativos em Nevada (EUA)	40
Figura 5: Tambor da usina piloto de isolamento no Novo México (EUA).....	41
Figura 6: Tela de interface doHotSpot	51
Figura 7: Curvas de isododes para Classe A	58
Figura 8: Curvas de isodoses para Classe D	58
Figura 9: Curvas de isodoses para Classe F	59
Figura 10: Curvas de isododes para Classe A	60
Figura 11: Curvas de isodoses para Classe D	61
Figura 12: Curvas de isodoses para Classe F	61
Figura 13: Curvas de isododes para Classe A	62
Figura 14: Curvas de isodoses para Classe D	63
Figura 15: Curvas de isodoses para Classe F	63
Figura 16: Curvas de isododes para Classe A	64
Figura 17: Curvas de isodoses para Classe D	65
Figura 18: Curvas de isodoses para Classe F	65
Figura 19: TED em função da distância. Classe A.....	67
Figura 20: TED em função da distância. Classe D	67
Figura 21: TED em função da distância. Classe F	68
Figura 22: TED em função da distância. Classe A	68
Figura 23: TED em função da distância. Classe D	69
Figura 24: TED em função da distância. Classe F	69
Figura 25: TED em função da distância. Classe A	70
Figura 26: TED em função da distância. Classe D	70
Figura 27: TED em função da distância. Classe F	71
Figura 28: TED em função da distância. Classe A	72
Figura 29: TED em função da distância. Classe D	72

Figura 30: TED em função da distância. Classe F	73
Figura 31: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A	78
Figura 32: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D	78
Figura 33: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F	78
Figura 34: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A	79
Figura 35: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D	79
Figura 36: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F	79
Figura 37: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A	80
Figura 38: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D	80
Figura 39: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F	80
Figura 40: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A	81
Figura 41: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D	81
Figura 42: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F	81

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Fator qualidade (Q) em função da transferência linear de energia não restrita na água, L. (Posição Regulatória CNEN 3.01/002:2011, p. 01)	26
Tabela 2: Fatores de peso da radiação ^[a] , W _R (Posição Regulatória CNEN 3.01/002:2011, p. 02).....	27
Tabela 3: Limites de Doses Anuais ^[a] (CNEN 3.01 pg. 13)	28
Tabela 4: Níveis genéricos de intervenção para ações de proteção urgentes. (Posição Regulatória CNEN 3.01/006:2011, pg. 03)	29
Tabela 5: Inventário de radionuclídeos.	48
Tabela 6: Dados para simulação no HotSpot.	49
Tabela 7: Parâmetros principais da simulação do incêndio.	50
Tabela 8: Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F (Homann, 2013).....	53
Tabela 9: Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno padrão (Homann, 2013).....	54
Tabela 10: Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno urbano (Homann, 2013).	54
Tabela 11: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 1	74
Tabela 12: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 2	75
Tabela 13: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 3	76
Tabela 14: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 4.....	77
Tabela 15: Interpretação do Risco Relativo. (Okuno, 2009).....	82

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
BEIR V	Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations
CNEN	Comissão Nacional De Energia Nuclear
CPU	Unidade Central De Processamento
DNA	Deoxyribonucleic Acid
GLP	Gás Liquefeito De Petróleo
IAEA	International Atomic Energy Agency
IFSTA	International Fire Service Training Association
IRCP	International Commission On Radiological Protection
IRCU	International Commission On Radiological Units Measurements
ISO	International Organization For Standardization
LSS	Life Span Study
NFPA	National Fire Protection Association
NRC	Nuclear Regulatory Commission
PQS	Pó Químico Seco
PQSE	Pó Químico Seco Especial
RBE	Eficiência Biológica Relativa
RFAS	Relatório Final De Análise De Segurança
TED	Dose Efetiva Total
TEDE	Equivalente de Dose Efetiva Total
SCI	Segurança Contra Incêndio
SDAI	Sistemas De Detecção E Alarme De Incêndio

RESUMO

A dispersão atmosférica de material radioativo é uma das possíveis consequências diante de um cenário de acidente em instalações nucleares, radiativas e depósito de rejeitos. Levando em consideração a possibilidade dessa liberação de material radioativo para a atmosfera, esse trabalho propôs uma modelagem da dispersão atmosférica a partir de um cenário de incêndio em um depósito de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação, variando a quantidade do inventário liberado no incêndio. Para essa simulação foi adotado o software de códigos físicos de saúde médica, o HotSpot Health Physics Codes, que utiliza o modelo gaussiano para calcular a dispersão atmosférica baseando-se nas classes de estabilidade atmosférica de Pasquill. Esse software calcula a Dose efetiva total em relação à distância, assim como a dose comprometida em uma lista de órgãos específicos, entre eles o pulmão, objeto de estudo desse trabalho para o cálculo do risco de câncer associado a uma baixa dose de radiação. O cálculo do risco radiológico é realizado empregando o modelo BEIR V, Biological Effects of Ionizing Radiations, um dos modelos para estimar o risco relativo de câncer induzido por radiação ionizante.

Palavras-chave: Incêndio; Dispersão Atmosférica; Rejeitos Radioativos; Depósito de Rejeitos Radioativos; Risco Radiológico

ABSTRACT

An atmospheric dispersion of radioactive material is one of the possible consequences of an accident scenario in nuclear installations, radiative and radioactive waste deposit. Taking into account a possibility of this release of radioactive material into the atmosphere this work proposes a modeling of the atmospheric dispersion from a fire scenario in a deposit of radioactive waste of low and middle level of radiation varying the amount of inventory released in the fire. For this simulation was adopted the software of physical codes of medical health, the HotSpot Health Physics Codes which uses the Gaussian model to calculate an atmospheric dispersion based on the Pasquill atmospheric stability classes. This software calculates a total effective dose in relation to distance, such as a compromised dose in a list of specific organs, among them the lung, object of work study for calculating the risk of cancer associated with a low dose of radiation. The radiological risk calculation is held by the BEIR V model, Biological Effects of Ionizing Radiations, one of the models to estimate the relative risk of cancer induced by ionizing radiation.

Keywords: Fire; Atmospheric Dispersion; Radioactive Waste; Radioactive Waste Deposit; Radiological Risk

1 INTRODUÇÃO

A política de proteção contra incêndios em instalações nucleares vem se desenvolvendo ao longo dos anos, por avanço tecnológico e também por experiências com os próprios acidentes, como o que ocorreu na usina nuclear Browns Ferry, em 1975 no EUA (U.S.N.R.C, 2014). Logo após esse acidente um novo nível de proteção contra incêndio foi desenvolvido, várias modificações foram incluídas nos critérios de projeto e operação das usinas, que se estendeu para outros países com a publicação do Safety Series nº 50 – SG –D2 – Fire Protection in Nuclear Power Plants (IAEA, 1979). No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) possui duas normas que regulamentam a proteção contra incêndio, são elas: norma 2.03 (CNEN, 1999) e a norma 2.04 (CNEN, 1997).

Grande parte dos acidentes nucleares presenciados até hoje envolveram a planta de operação das usinas, como foi o caso mais recente da central nuclear de Fukushima em 2011, no Japão. Contudo há uma característica em comum nos casos envolvendo incêndio em instalações nucleares, que é a possível liberação de resíduos radioativos para a atmosfera. Assim como na planta de operação das usinas, incêndios em depósitos de rejeitos radioativos podem trazer sérias consequências e resultar em danos significativos ao meio ambiente e a saúde do público envolvido, como também causar prejuízos financeiros e à imagem da energia nuclear.

Conforme a norma 8.02 (CNEN, 2014c) em relação a obtenção da autorização para operação do depósito de rejeitos radioativos, faz-se necessário que o titular do depósito submeta a CNEN um Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS), incluindo obrigatoriamente algumas informações, dentre elas as informações relacionadas à segurança contra incêndios e a segurança radiológica.

A norma 8.02 (CNEN, 2014c) também determina que cabe ao titular do depósito fornecer uma descrição completa dos aspectos relevantes do clima da região e dos parâmetros meteorológicos característicos e representativos do depósito e de seu entorno, abrangendo, conforme aplicável, informações suficientes para respaldar os cálculos de dispersão atmosférica: valores dos parâmetros relevantes (direções e velocidades dos ventos, precipitações e estabilidade atmosférica) nas condições predominantes, máximos instantâneos, assim como valores médio em períodos apropriados (anuais, estacionários e

mensais) e referidos à sua distribuição direcional segundo a rosa dos ventos, conforme utilizados para determinar a zona de influência do depósito.

O monitoramento dos procedimentos de operação normal do depósito e as simulações de possíveis cenários de acidentes auxiliam no levantamento de dados para que possa ser feita uma análise de risco relacionada operação da instalação. Um dos objetivos dessa análise é obter informações que possam servir de ferramentas em situações de emergências.

1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho de dissertação tem como objetivo geral realizar a análise de risco radiológico devido a um cenário de incêndio em um depósito de rejeitos radioativo de baixo e médio nível de radiação.

1.1 Objetivo Específico

Os objetivos específicos no presente trabalho de dissertação podem ser listados na seguinte forma:

- Caracterizar o inventário radioativo do depósito de rejeitos;
- Estabelecer parâmetros do incêndio e da dispersão atmosférica;
- Modelar a dispersão atmosférica a partir do incêndio considerado e do inventário a ser liberado;
- Obter a dose equivalente total associada ao cenário modelado;
- Calcular o risco radiológico para o público.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Shamsuddin et al. (2017) no trabalho desenvolvido visavam estudar o impacto de um acidente nuclear fictício com o objetivo de realizar uma análise de dispersão radioativa,

simulando a dispersão padrão de radionuclídeos originados de um local escolhido em Manjung, Perak. O trabalho foi realizado usando o HotSpot Health Physics Codes. Considerando dois radionuclídeos Cs 137 e I 131. Os resultados mostraram que a dispersão de radionuclídeos pode alcançar até 80 km do local de origem, onde está localizada a capital de Perak, Ipoh. Contudo, a dose efetiva anual estimada não é superior ao limite de 1 mSv, o que é considerado aceitável no ponto de vista do risco de saúde radiológica para o ser humano e o meio ambiente.

Domingos et al. (2017) propuseram uma simulação de incêndio em um depósito de rejeitos radioativos envolvendo uma mistura contendo nove radionuclídeos. O objetivo era estimar o risco radiológico derivado desse cenário utilizando um modelo gaussiano de dispersão atmosférica disponibilizado pelo HotSpot. Os resultados obtidos revelaram um aumento no risco relativo entre as mulheres e em pessoas recém expostas.

Rother et al. (2016) estimaram o risco de desenvolvimento câncer induzido por radiação ionizante provocado por um dispositivo de dispersão radiológica (RDD) que é uma arma simples capaz de causar danos humanos, contaminação ambiental, destruição, negação de área e custo econômico. Pode afetar áreas pequenas, grandes ou longas dependendo da estabilidade atmosférica. Este artigo propõe e demonstra uma convergência de três capacidades diferentes para avaliar o risco e suportar uma resposta rápida e eficiente em recursos seguros. As três capacidades integradas são Hotspot para dispersão, RERF para risco epidemiológico e RESRAD-RDD para orientação de resposta.

Pirouzmand et al. (2015) realizaram uma avaliação de doses individuais e coletivas em torno da unidade-1 da Bushehr nuclear power plant (BNPP-1) em condições normais de operação e condições de acidente por uma grande perda de refrigerante (LBLOCA). Os valores de TEDE (Equivalente de dose efetiva total) foram calculados pelo HotSpot Health Physics Codes e os valores de CEDE (Equivalente de dose efetiva comprometida) pelo computacional denominado CAP88-PC (Clean Air Act Assessment Package – 1988 –) que é um modelo que possui programas computacionais, base de dados e utilitários associados para estimativa de dose e risco da emissão de radionuclídeos na atmosfera. Uma comparação entre dados calculados e os dados do relatório final de análise de segurança revelou que os resultados do hotspot superestimam o RFAS em dados de curta distância. As discrepâncias nos resultados e doses coletivas, respectivamente, confirma que a eficácia em relação as doses do público em torno do BNPP-1 sob reator normal. As condições de operação estão abaixo da

restrição de dose pública de 0,1 mSv / ano estabelecido pela Autoridade Reguladora Nuclear Iraniana para o BNPP-1. O valor máximo de TEDE é de cerca de 10 mSv / ano perto do centro do local do reator (menos de 0,6 km). Esse valor é menor do que o limite de dose ocupacional (50 mSv / ano) recomendado pela ICRP e pela IAEA, no entanto, é maior do que o valor máximo relatado no RFAS (5 mSv / ano) durante as condições LBLOCA.

Muswema et al. (2014) realizaram uma análise da modelagem da dispersão atmosférica e segurança radiológica para um acidente postulado, cenário do núcleo genérico de Urânio de baixo enriquecimento Ghana Research Reactor-1 (GHARR-1). O termo fonte foi gerado a partir de um inventário das atividades pico de radioisótopos liberadas usando o código de transporte de partícula por Monte Carlo, MCNPX. O HotSpot Health Physics Codes, foi usado para executar o modelo atmosférico de transporte que foi aplicado para calcular a dose efetiva total e como seria distribuído aos órgãos humanos como função da distância a favor do vento. Todos os cenários de acidentes foram selecionados do Relatório de Análise de Segurança GHARR-1 (SAR), assumindo que as atividades foram lançadas para a atmosfera após um acidente de base no projeto.

Anvari e Safarzadeh (2012) neste estudo, foi simulado um acidente hipotético, a dose que será recebida pela população envolvida é o resultado da liberação de radionuclídeos provenientes do reator de pesquisa de Teherã de 5 MW o TEDE foi calculado usando Hotspot Health Physics Codes. Nessa condição hipotética o sistema de ventilação do reator tornou-se inoperante devido a problemas no núcleo do reator, escaparam da pilha material radioativo na forma de gás e partículas, em seguida foram dispersos na atmosfera. Foram consideradas várias classes de dispersão atmosférica, porém foi observado que a condição atmosférica instável apresentou um aumento nos valores de TEDE. Os resultados computacionais para lançamento acidental indicaram que os valores máximos de TEDE para pessoal e população em torno do sítio do reator de pesquisa do Teherã, são inferiores aos limites da dose efetiva anual para trabalhadores e população. Portanto, concluíram que os padrões de segurança são razoavelmente alcançados nesse sítio.

Grande parte desses estudos envolvem simulações de acidentes em reatores nucleares considerando a liberação de material radioativo para atmosfera. Assim, nesses estudos há uma preocupação em estimar a dose resultante do cenário que foi simulado e realizar um comparativo com as normas vigentes. No caso desse presente estudo trata-se também de uma liberação de material radioativo para atmosfera, porém, derivada de um incêndio em um

depósito de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação, onde, além de comparar os resultados das simulações com os limites estabelecidos pela norma, é aplicado um modelo cálculo para risco de câncer induzido por radiação ionizante no sistema respiratório considerando a dose resultante da simulação realizada no HotSpot.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GRANDEZAS RADIOLÓGICAS

2.1.1 Constante de decaimento

Para uma quantidade grande de átomos, o número de transformações por segundo é proporcional ao número de átomos que estão por se transformar naquele instante. Portanto a probabilidade de decaimento por átomo por segundo deve ser constante, independente de quanto tempo ele tem de existência. Esta probabilidade de decaimento por átomo por segundo é denominada de Constante de Decaimento λ e é característica de cada radionuclídeo. (Tauhata, 2013)

2.1.2 Atividade

A atividade de uma amostra radioativa representa o número de núcleos da amostra, N , que se desintegram, ou seja, que sofrem transformações nucleares, por unidade de tempo. E a atividade é proporcional ao número de átomos excitados presentes no elemento radioativo. (Andreucci, 2016)

$$A = \lambda \cdot N$$

Ou seja,

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

A_0 = atividade inicial do elemento radioativo.

A = atividade do elemento radioativo após decorrido um certo intervalo de tempo.

λ = constante de desintegração característica do material radioativo

t = tempo decorrido.

Ainda segundo Andreucci, assim como no decaimento radioativo, a atividade de um certo elemento diminui progressivamente com o passar do tempo, mas nunca se torna igual a zero. A unidade padrão de atividade é o *Becquerel*, que é definida como sendo a quantidade de qualquer material radioativo que sofre uma desintegração por segundo.

2.1.3 Meia-vida

A meia-vida de um isótopo radioativo, $t_{1/2}$, é o tempo necessário para que metade dos átomos contidos numa amostra desse isótopo sofra desintegração, logo: (Tauhata, 2013)

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2)$$

2.2 RADIAÇÃO IONIZANTE

Radiação ionizante trata-se da radiação capaz de ionizar, ou seja, extrair elétrons, direta ou indiretamente, dos átomos do meio material pelo qual passa. Todo e qualquer tipo de radiação ionizante apresenta algumas propriedades físicas, onde uma delas possui ações lesivas ao organismo humano, podendo causar a morte de um número elevado de células e provocando colapso do tecido, que deixa de exercer suas funções no organismo (Santos, 2010).

Apesar da radiação ionizante não ser aparentemente perceptível ela possui efeitos nocivos as células vivas. O dano causado pela radiação pode ser acumulativo, assim, mesmo que a grande parte dos danos sejam restaurados ao longo do tempo, existe a possibilidade que uma pequena fração não consiga se restaurar.

Santos (2010) define os fatores que influenciam na magnitude dos efeitos biológicos causados pela radiação em nosso organismo:

- Taxa de exposição: quanto maior for a radiação aplicada, maior será seu efeito. Quando a dose é dividida em pequenas frações administrada por um longo tempo, a tendência é diminuir um gama dos efeitos produzidos por essa radiação.
- Área exposta: a área exposta é diretamente proporcional ao efeito causado pela radiação, ou seja, quando a radiação é bloqueada em parte do corpo os danos tendem a diminuir.
- Variação de sensibilidade celular: as células jovens com o processo de reprodução mais significativo, e que ainda não tenham aprimorado suas funções são mais suscetíveis a danos que as células que não se reproduziram e que tem suas funções definidas. A variedade de células do corpo humano pode ser classificada de acordo com sua sensibilidade a radiação.

2.2.1 Efeitos biológicos da radiação ionizante

Esses efeitos podem receber denominações em função do valor da dose e a forma de resposta, em função do tempo de manifestação e do nível orgânico atingido. Os efeitos biológicos da radiação são classificados em determinísticos e estocásticos. (Tauhata, 2013)

2.2.1.1 Efeitos estocásticos

São aqueles cuja a probabilidade de ocorrência é em função da dose, não existindo limiar. Isto significa, que doses pequenas, abaixo dos limites estabelecidos por normas e recomendações de proteção radiológica, podem induzir tais efeitos, como é o caso do câncer. Assim para qualquer indivíduo irradiado possui uma chance de que certos efeitos relacionados

a radiação se manifestem, porém, isso ocorrerá após um longo tempo depois da irradiação do indivíduo.

2.2.2.2 Efeitos determinísticos

Esses efeitos surgem em um curto espaço de tempo (dias, horas, minutos) a partir de um limiar de dose necessária para sua ocorrência e cuja a gravidade aumenta com a dose. Esses efeitos são atribuídos principalmente, à morte celular ou perda de capacidade de reposição de células que estão em constante reprodução. A probabilidade de efeito determinístico, assim definido, é considerada nula para valores de dose abaixo do limiar, e 100%, acima.

2.3 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

De acordo com ICRP “International Commission on Radiological Protection”, os objetivos da proteção radiológica resume-se na manutenção e conservação das condições apropriadamente seguras para atividades que envolvam exposição humana.

2.3.1 Princípios da proteção radiológica

Segundo Andreucci (2016) os objetivos básicos da radioproteção é a manutenção e conservação das condições apropriadamente seguras para as atividades envolvendo exposição humana. Sendo assim, três princípios fundamentais são importantes para consolidar a proteção radiológica:

- **Justificativa:** Nenhuma prática deve ser adotada a menos que sua introdução produza um benefício positivo para a sociedade;

- **Princípio da Otimização:** Toda exposição deve ser mantida tão baixo quanto razoavelmente possível levando em consideração fatores econômicos e sócias;
- **Princípio da Limitação de Dose (ALARA):** As doses equivalentes para os indivíduos do público não devem exceder os limites recomendados para as circunstâncias apropriadas.

2.3.2 Grandezas de radioproteção

Dois tipos de grandezas são definidos para o uso na proteção radiológica. A primeira são as grandezas limitantes, que são definidas pela ICRP, e são usadas para indicar o risco a saúde humana devido a exposição à radiação ionizante. A segunda são as grandezas operacionais definidas pela ICRU (International Commission on Radiological Units Measurements) e que levam em consideração as atividades de radioproteção.

Indicadas para limitar o risco à saúde humana devido à radiação ionizante, as grandezas de proteção radiológica ou de limitação de risco ICRP são extremamente importantes. Há três grandezas principais aconselhadas pela ICRP 26, são elas: a dose absorvida, dose equivalente em um órgão ou tecido (H_T) e a Dose Efetiva (E).

2.3.2.1 Dose absorvida

De acordo com a UFRGS (2006) quando um material qualquer é colocado em um campo de radiação, este absorverá uma determinada quantidade de energia. A energia absorvida por cada grama de material chama-se dose absorvida, sendo medida em joules por kilograma, ou seja: A Dose Absorvida (D), de qualquer radiação ionizante, é o quociente entre ΔE e Δm , onde ΔE é a energia transferida pela radiação à matéria, num volume elementar cuja massa é Δm .

$$D = \Delta E / \Delta m \quad (3)$$

A unidade antiga de dose absorvida que se aplica a qualquer tipo de radiação e a qualquer meio material, é o rad (radiation absorbed dose) e equivale a:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/Kg} \quad (4)$$

1 rad é aproximadamente igual a dose absorvida pelo tecido mole vivo quando exposto a 1R de raios X de média energia (aproximadamente 250Kev). A nova unidade de dose absorvida é denominada “gray” símbolo Gy, sendo definida como:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg e, portanto: } 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} \quad (5)$$

A dose absorvida não é suficiente para caracterizar os diversos efeitos biológicos das radiações: uma mesma dose absorvida pode produzir efeitos biológicos distintos, dependendo do tipo de radiação. Por esse motivo foi definido o conceito de dose equivalente.

2.3.2.2 Dose Equivalente

Ainda segundo a UFRGS (2006) a Dose Equivalente H, é obtida multiplicando-se a dose absorvida D pelo Fator de qualidade Q, ou seja:

$$H = D \cdot Q \quad (\text{J/Kg} = \text{Sievert}) \quad (6)$$

O fator de qualidade Q (Tabela 1) não possui dimensão e constitui um fator de peso originário da simplificação dos valores da Eficiência Biológica Relativa (RBE) dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico. Estes valores não devem ser usados para avaliar os efeitos de exposições acidentais com altas doses.

Tabela 1: Fator qualidade (Q) em função da transferência linear de energia não restrita na água, L. (Posição Regulatória CNEN 3.01/002:2011, p. 01)

L na água em (Kev/ μ m)	Q(L)
<10	1
10-100	$0,32L - 2,2$
>100	$300/\sqrt{L}$

2.3.2.3 Dose equivalente em um órgão ou tecido (H_T)

A grandeza física fundamental da dosimetria é a dose absorvida. Na proteção radiológica, a grandeza básica é a dose absorvida média no órgão ou no tecido humano. Para um mesmo valor de dose absorvida, observa-se que algumas radiações são mais efetivas que outras em causar efeitos estocásticos. Para considerar isto, foi introduzida uma grandeza mais apropriada, a dose equivalente, H_T , definida como o produto da dose absorvida média em um órgão ou tecido pelo fator de peso da radiação W_R . (CNEN, 2014a)

$$H_T = D_{T,R} \cdot W_R \quad (7)$$

A dose equivalente é expressa em $J.kg^{-1}$ no Sistema Internacional de Unidades (SIU). Para evitar confusão com o conceito de dose absorvida, a unidade especial para a dose equivalente recebe o nome de sievert (Sv). Os fatores de peso da radiação W_R são fornecidos pela ICRP 60 com base nos valores da Eficácia Biológica Relativa (RBE) da radiação na indução de efeitos estocásticos a baixas doses. Os valores de W_R , apresentados na tabela 2, são relacionados à radiação externa incidente sobre o corpo ou à radiação emitida por radionuclídeos incorporados.

Tabela 2: Fatores de peso da radiação ^[a], W_R (Posição Regulatória CNEN 3.01/002:2011, p. 02)

Tipo e faixa de energia ^[b]	Fator de peso da radiação, W_R
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e muons, todas as energias ^[c]	1
Neutrons ^[d] , energia:	
< 10 Kev	5
10 Kev a 100 Kev	10
>100 Kev a 2 Mev	20
>2 Mev a 20 Mev	10
>20 Mev	5
Prótons, exceto os de recuo, energia > 2Mev	5
Partículas α , fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

[a] Valores para outras radiações podem ser obtidos pelo Anexo A da ICRP-60.

[b] Todos os valores se relacionam à radiação incidente no corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

[c] Excluindo elétrons Auger emitidos por radionuclídeos ligados ao DNA, para os quais se aplicam considerações especiais de microdosimetria.

[d] Para consistência nos cálculos, pode-se usar a seguinte expressão para a estimativa de W_R para nêutrons, em função da energia: $wR = 5 + 17 \exp[-(\ln 2 \varepsilon) 2 / 6]$, onde ε é a energia em MeV.

Para os tipos de radiação não incluídos na tabela acima, os fatores de peso da radiação podem ser aproximados dos valores do fator de qualidade (Q) apresentados na tabela 1.

2.3.2.4 Dose efetiva (E)

No sentido de representar o dano combinado dos efeitos estocásticos causados pelas doses equivalentes em todos os órgãos e tecidos do corpo, a dose equivalente em cada órgão e tecido é multiplicada pelo respectivo fator de peso do tecido, W_T , sendo, então, feito o somatório desses produtos para obter a dose efetiva. (CNEN, 2014a)

$$E = \sum_T W_T + H_T \quad (8)$$

Onde H_T é a dose equivalente no tecido, W_T é o fator de peso de ponderação do tecido T ($\sum W_T = 1$) (ICRP, 2007). No Sistema Internacional de Unidades, a dose efetiva é expressa em sievert (Sv).

2.3.2.5 Limite de dose individual

Uma das metas da proteção radiológica é a restrição da exposição normal do indivíduo do público com o objetivo de que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou em um tecido específico, ocasionadas por possíveis combinações de exposições derivadas de práticas autorizadas, excedam os limites de dose previstos na norma (Tabela 3), salvo em circunstâncias autorizadas pela CNEN. Esses limites de dose não se aplicam às exposições médicas.

Tabela 3: Limites de Doses Anuais ^[a] (CNEN 3.01 pg. 13)

Grandeza	Órgão	Indivíduo	
		ocupacionalmente exposto	Indivíduo do Público
Dose Efetiva	Corpo Inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
	Cristalino	20 mSv ^[b]	15 mSv
Dose Equivalente	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mão 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 aritmética 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.

2.3.3 Situações de emergência radiológica

Um dos possíveis cenários de ocorrência em proteção radiológica é quanto a operação das instalações ou procedimentos técnicos, que podem apresentar falhas na operação, ocasionando eventos indesejáveis e até perigosos. Em situações como essas, a tomada de decisões deve ser eficiente e rápida, para evitar danos crescentes à medida que o tempo passa.

As medidas de proteção e critérios de intervenção em situações de emergências estão previstas na Posição Regulatória 3.01 (CNEN, 2011). Ações protetoras com base nas doses projetadas são justificadas nos casos em que os resultados apontam a probabilidade de ocorrerem danos à saúde. Sendo assim, para qualquer decisão de não implementar a ação protetora deverá haver uma justificativa.

Em situações onde ocorre liberação de material radioativo, algumas medidas de proteção urgentes precisam ser empregadas, são elas: a abrigagem, a evacuação, a administração de iodo estável e o controle de alimentos. Essas medidas são sustentadas através de uma avaliação das condições de exposição externa e das doses de inalação sujeitas a população. Geralmente essas estimativas dependem das concentrações dos contaminantes no ar e no solo e consideram a liberação do material radioativo a favor do vento. Os níveis de intervenção recomendados para essas medidas de proteção estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Níveis genéricos de intervenção para ações de proteção urgentes. (Posição Regulatória CNEN 3.01/006:2011, pg. 03)

Ação de Proteção	Nível genérico de intervenção (Dose evitada pela ação protetora)
Abrigagem	10 mSv ^[1]
Evacuação	50 mSv ^[2]
Profilaxia por Iodo Estável	100 mGy ^[3]

[1] A abrigagem não é recomendada por um período superior a 2 (dois) dias.

[2] A evacuação não é recomendada por um período superior a 1 (uma) semana.

[3] Dose absorvida comprometida evitada na tireoide.

2.4 AVALIAÇÃO DE RISCO

A ABNT (2015) define Risco como o efeito da incerteza sobre um resultado esperado. O processo de avaliação do risco fornece aos tomadores de decisão e as partes responsáveis um entendimento aprimorado dos riscos que poderiam afetar o alcance do seu objetivo, bem como a adequação e eficácia dos controles em uso. Isto fornece uma base sobre a abordagem mais adequada a ser utilizada para tratar os riscos. A saída do processo de avaliação de riscos é uma entrada para os processos de tomadas de decisão por parte dos responsáveis. (ABNT, 2009)

A avaliação de um evento ou cenário baseada no risco possui vantagens como: considerar tanto as probabilidades quanto as consequências; fornecer uma base para comparar os efeitos de diferentes cenários em termos de relevância e integrar os efeitos de todos os tipos de cenários. Dentre as desvantagens estão o conceito de risco, que não é facilmente entendido; a atribuição de valores para a probabilidade não é uma tarefa fácil; e pessoas tendem a dar maior importância se as doses forem elevadas, mesmo que a probabilidade de ocorrência seja mínima. (IAEA, 1999 *Apud* Aguiar, 2006)

2.4.1 Risco de câncer induzido por radiação ionizante

A radiação ionizante tem sido objeto de intensa investigação epidemiológica. Após a explosão das bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki, Japão 1947, foi estabelecida a Atomic Bomb Casualty Commission (ABCC) com auxílio da United States National Academy of Sciences para começar os estudos epidemiológicos de longa duração sobre efeitos das radiações ionizantes nos sobreviventes das duas cidades. Esse trabalho era uma colaboração entre Estados Unidos e Japão. A ABCC foi substituída pela Radiation Effects Research Foundation (RERF) em 1975, uma fundação japonesa sem fins lucrativos, administrada em parceria pelos governos do Japão e dos Estados Unidos. (Okuno, 2009)

A RERF vem desenvolvendo uma série de pesquisas desde então, sendo seus principais temas: estudo do tempo de duração da vida (Life Span Study - LSS), estudo da saúde de adultos, estudo de patologias e estudo de mortalidade, entre outros. (RERF, 2018)

O principal objetivo desse estudo epidemiológico é correlacionar a mortalidade e a incidência de câncer induzido pela radiação ionizante com o grau de exposição. O LSS é o mais importante estudo do mundo, considerando o tamanho da população analisada, duração da pesquisa e dados minuciosamente registrados ao longo dos anos. Muitos resultados importantes continuam sendo obtidos e eles são usados para estimar o grau de risco da radiação ionizante na saúde humana.

2.4.1.1 Estudo Coorte

De acordo com Okuno (2009) o estudo coorte como o LSS, seleciona indivíduos com base no nível de exposição, observando que nenhum deles está doente quando se inicia o estudo. É um estudo de longa duração, em geral um estudo probabilístico, que acompanha a partir de uma data, por vários anos, um grupo de pessoas que claramente estiveram expostas ao fator investigado em diferentes níveis, ou um grupo exposto e outro não exposto ou exposto em menor intensidade. À medida o estudo evolui, o pesquisador vai contabilizando o aparecimento da doença. Um exemplo é a verificação do surgimento de casos de leucemia em crianças que estiveram expostas à radiação ionizante ainda no útero. Os dados coletados consistem de informação sobre o grau de exposição dos indivíduos e o aparecimento e desenvolvimento de uma dada doença. Em um estudo de epidemiologia relacionado aos efeitos da radiação ionizante o interesse está em determinar se a taxa de incidência entre os expostos à radiação é maior que a taxa entre os que não expostos. Se isso ocorrer é porque há uma associação entre a radiação ao qual essas pessoas estiveram expostas e o subsequente aparecimento da doença. A pergunta a ser efetuada é quão forte é essa associação. Para responder a essa pergunta, calcula-se o Risco Relativo ou o Risco Proporcional (RR), que é uma medida da intensidade de associação em um caso observacional. Lembrando que RR é uma grandeza adimensional; se o $RR=1$, não há associação entre a presença de um agente e o evento; se $RR>1$, a associação é positiva e a presença desse agente se associa a uma maior ocorrência de evento; e se $RR<1$ a associação é negativa. O RR é útil porque diz quantos

casos extras de incidência da doença são esperados em uma população específica nos próximos anos, sabendo-se a exposição e o fator de risco correspondente. (Okuno, 2009)

2.5 REJEITOS RADIOATIVOS

Rejeitos radioativos são materiais radioativos que não há nenhuma possibilidade de utilização atual ou futuramente. Esses rejeitos são resultantes de vários processos, como fontes de radioterapia que não possui mais utilidade para tratamento devido à radioatividade abaixo da recomendada para essa finalidade; materiais contaminados em atividades com fontes radioativas abertas; materiais que são utilizados em pesquisa e não reutilizáveis, materiais contaminados na operação de centrais nucleares; para-raios radioativos fora de uso; materiais fabricados nas usinas nucleares, desde a mineração até a produção do combustível. Para o gerenciamento dos rejeitos e sua destinação são levados em consideração os níveis de concentração de radionuclídeos e a forma química e física dos mesmos.

Há rejeitos radioativos que podem atingir níveis em que se tornam inofensivos, sendo assim permitem sua dispensa como rejeitos normais. As condições para dispensa estão estabelecidas na norma 8.01 (CNEN, 2014b) essa estabelece os critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relativos ao licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação.

2.5.1 Classificação dos rejeitos radioativos

A norma 8.02, de Gerência de rejeitos radioativos em Instalações Radiativa (CNEN, 2014c) define a classificação dos rejeitos radioativos segundo seus níveis e natureza da radiação, assim como sua meia-vida. Essa classificação está relacionada ao nível de dispensa, armazenamento e por consequência, ao tipo de deposição que deverão atender. As principais classes são:

- **Classe 0:** Rejeitos Isentos (RI): rejeitos contendo radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa estabelecidos na norma 8.01 (CNEN, 2014b).

- **Classe 1:** Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC): rejeitos com meia-vida inferior ou da ordem de 100 dias, com níveis de atividade ou de concentração em atividade superiores aos respectivos níveis de dispensa e que podem atender, num período de até 5 anos, aos critérios de dispensa estabelecidos na norma.

- **Classe 2:** Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN): rejeitos com meia-vida superior à dos rejeitos da Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração em atividades superiores aos níveis de dispensa estabelecidos em Norma CNEN, bem como com potência térmica inferior a 2 kW/m³. A Classe 2 é subdividida em subclasses de acordo com determinadas características desse tipo de rejeitos, são elas:

- Classe 2.1: Rejeitos de Meia-Vida Curta (RBMN-VC): rejeitos de baixo e médio níveis de radiação, emissores beta/gama, com meia-vida inferior ou da ordem de 30 anos e com concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa limitada em 3700 kBq/kg, acondicionados em volumes individuais e com um valor médio de 370 kBq/kg para o conjunto de volumes;

- Classe 2.2: Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RNp): rejeitos de baixo e médio níveis de radiação, provenientes de extração e exploração de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos no Anexo V da Norma 8.01 (CNEN, 2014b) Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação;

- Classe 2.3: Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RNm): rejeitos contendo matérias-primas minerais, naturais ou industrializadas, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos limites de dispensa estabelecidos também no Anexo V da norma.

- Classe 2.4: Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL): rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3.

- **Classe 3:** Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN): Rejeitos com potência térmica superior a 2kW/m³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.

2.5.2 Métodos de dispensa ou deposição

Segundo a norma 8.01 (CNEN, 2014b) os rejeitos radioativos da Classe 0 podem ser dispensados sem restrições radiológicas; os da Classe 1 precisam ser armazenados para decaimento e, posteriormente, dispensados, sem restrições radiológicas, na rede de esgotos sanitários ou no sistema de coleta de resíduo urbano, atendendo aos requisitos favoráveis de dispensa estabelecidos na norma da CNEN. A classe 2 de rejeitos radioativos é dividida em subclasses que determinam os métodos de deposição: a) os rejeitos radioativos da Classe 2.1 devem ser depositados em depósitos próximos à superfície; b) os rejeitos radioativos das Classes 2.2 e 2.3 devem ser depositados em depósitos próximos à superfície ou em profundidade definida pela análise de segurança; e c) os rejeitos radioativos da Classe 2.4 devem ser depositados em formações geológicas com profundidade definida pela análise de segurança.

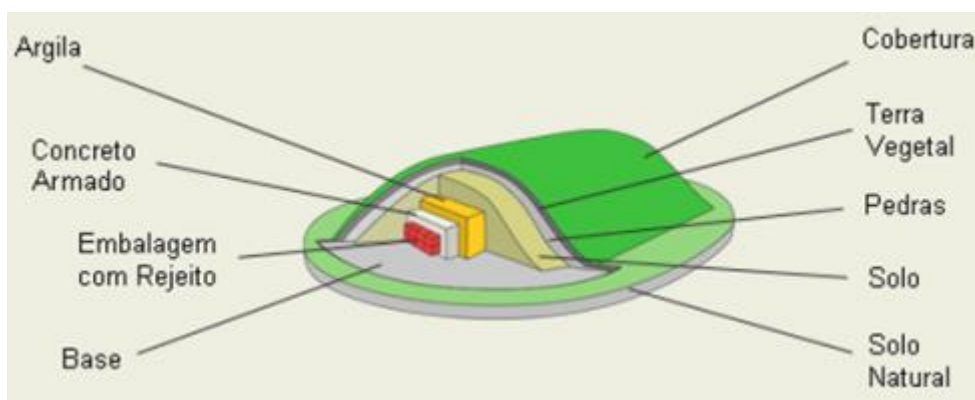


Figura 1: Repositório próximo a superfície para rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação
Fonte: VAE, 2017.

2.5.3 Gerência de rejeitos radioativos

Existem alguns requisitos básicos na norma 8.01 de gerência de rejeitos de baixo e médio nível de radiação (CNEN, 2014b) entre eles estão:

- Garantia de minimização do volume e da atividade dos rejeitos radioativos produzidos nas instalações nucleares, radiativa, minero-industrial ou depósito de rejeitos radioativos.
- Os rejeitos radioativos devem ser segregados de qualquer outro material, essa segregação deve ser realizada no mesmo local onde os mesmos foram gerados ou em ambiente adequado, levando em consideração as características estabelecidas na norma da CNEN. Após a segregação esses rejeitos devem ser acondicionados em embalagens e identificados atendendo também aos requisitos constantes da norma.
- Os rejeitos radioativos devem ser mantidos separados de outros produtos perigosos, como explosivos, inflamáveis, oxidantes e corrosivos, conforme determinado pela análise de segurança.
- O armazenamento de rejeitos líquidos deve ser feito sobre bacia de contenção, bandeja, recipiente ou material absorvente com capacidade de conter ou absorver o dobro do volume do rejeito líquido presente na embalagem.

2.5.4 Depósito de rejeitos radioativos

Depósito de rejeitos radioativos (ou simplesmente depósito) pode ser definido como uma instalação ou edificação adequada para o armazenamento ou deposição de materiais radioativos. Segundo a norma 8.02 são classificados em três tipos de depósitos: (CNEN, 2014c)

- **Depósito inicial:** destinado ao armazenamento de rejeitos radioativos, até o seu descarte ou transferência, cuja responsabilidade para administração e operação é do titular. O depósito inicial pode ser parte de uma instalação nuclear ou radiativa. Ex. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), em Itaorna, os rejeitos radioativos ficam em depósitos, dentro da área da CNAAA. (Figura 2).



Figura 2: Depósito Inicial CNAAA
Fonte: Eletronuclear

- **Depósito intermediário:** destinado a receber e, eventualmente, acondicionar rejeitos radioativos, objetivando a sua remoção para depósito final.

- **Depósito final:** depósito licenciado e destinado à deposição final de rejeitos radioativos, sem intenção de removê-los. Como é o caso do depósito do Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro Oeste (CRCN-CO) em Abadia de Goiás-GO. Este é um exemplo de depósito superficial de baixo e médio nível. Figura 3



Figura 3: Depósito final localizado no CRCN-CO em Abadia de Goiás
Fonte: CRNC-CO

- **Depósito provisório:** destinado a receber rejeitos radioativos provenientes de acidentes nucleares ou radiológicos.

2.5.4.1 Licenciamento

Segundo a norma 8.02 (CNEN, 2014c) para o licenciamento de um depósito de rejeitos é necessário a emissão pela CNEN dos seguintes atos administrativos:

- a) Aprovação do local
- b) Autorização para construção
- c) Autorização para a operação
- d) Autorização para descomissionamento de depósitos iniciais, intermediários ou provisórios
- e) Autorização para encerramentos, somente depósitos finais.

2.5.4.2 Inventário

O controle do inventário do rejeito armazenado, e de todos os registros associados é uma exigência da CNEN e também parte integrante da análise de segurança, sendo assim esse conjunto de informações deve estar disponível durante toda a vida útil da instalação. Os registros detalhados dos rejeitos recebidos e disposto do repositório, juntamente com todos os registros relevantes de procedimentos operacionais, devem ser documentados e estarem disponíveis para acesso a qualquer momento.

Durante a operação e após seu encerramento o depósito pode estar sujeito a ações humanas, acidentais ou intencionais, entretanto a sua operacionalidade não pode ser comprometida. Através do inventário e registros do depósito é possível tomar decisões em casos de emergências e minimizar possíveis danos. As informações adequadas sobre o depósito devem existir no fechamento do depósito durante o tempo determinado pelos estudos de análise de segurança.

Garantir a transferência de informações às sociedades futuras possibilitará tomadas de decisões conscientes a respeito do projeto e do conteúdo do depósito. As sociedades devem permitir, da melhor maneira possível que as sociedades futuras façam seus próprios julgamentos sobre o depósito e a gerência continuada de seu conteúdo (IAEA, 2001b).

2.6 INCÊNDIO

A classificação a seguir foi desenvolvida pela NFPA – Associação Nacional de Proteção a Incêndio, Estados Unidos, e adotada pelas seguintes instituições: IFSTA – Associação internacional para Treinamento de Bombeiros, Estados Unidos; ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil e também pelo Corpo de Bombeiros brasileiro. (Gomes, 2014)

Os incêndios são classificados segundo os materiais neles envolvidos, bem como a situação em que eles se encontram. Essa classificação determina a necessidade do agente extintor adequado.

- **Classe “A”**: fogo em combustíveis sólidos como, por exemplo, madeiras, papel, tecido, borracha, etc. É caracterizado pelas cinzas e brasas que deixa como resíduos, sendo que a queima acontece na superfície e em profundidade. O melhor método de extinção é o resfriamento, sendo os agentes extintores que podem ser usados são a água e PQS (Pó químico seco) ABC.

- **Classe “B”**: fogo em líquidos inflamáveis, graxas e gases combustíveis, como, por exemplo, gasolina, óleo, querosene, GLP, etc. É caracterizado por não deixar resíduos e queimar apenas na superfície exposta. O melhor método de extinção é por abafamento, sendo os agentes extintores que podem ser usados são a espuma, o PQS BC e PQS ABC. Não se deve usar a água.

- **Classe “C”**: fogo em materiais e equipamentos energizados, como, por exemplo, motores, transformadores, geradores, etc. É caracterizado pelo risco de vida que oferece, sendo importante nunca usar extintor de água. O melhor método de extinção é por interrupção da reação em cadeia ou por abafamento, com o uso de extintores de PQS BC, PQS ABC e CO₂. O extintor de CO₂ é o mais indicado por não deixar resíduos que danifiquem os equipamentos.

- **Classe “D”**: fogo em metais combustíveis, como, por exemplo, magnésio, selênio, antimônio, lítio, potássio, alumínio fragmentado, zinco, titânio, sódio e zircônio, etc. É caracterizado pela queima em altas temperaturas e por reagir com agentes extintores comuns, principalmente se contem água. O melhor método de extinção é por abafamento, com o uso de extintores de pó químico seco especial (PQSE).

Existem algumas classes especiais ainda são pouco conhecidas no Brasil:

- **Classe “K”**: fogo envolvendo óleo vegetal e gordura animal, tanto no estado sólido ou líquido, tendo como exemplo de ambientes as cozinhas comerciais ou industriais. Essa classe é ainda pouco conhecida no Brasil. O melhor método de extinção é por abafamento e também nunca se deve usar água. Esta classe possui agente extintor especial para sua classe, com alto custo.

- **Classe “E”**: fogo envolvendo material radioativo e químico em grandes proporções, sendo necessário equipamentos e equipes altamente treinadas.

2.6.1 Casos de incêndio em depósito de rejeitos radioativos

Alguns incêndios envolvendo depósito de rejeitos radioativos são citados a seguir:

Em 15 de outubro de 2015 houve um incêndio no depósito de rejeitos de baixo nível de radiação localizado ao sul de Nevada (EUA), onde ocorreu liberação de material radioativo para atmosfera. Não foram divulgados detalhes sobre o incêndio nem o que poderia ter sido a causa. (Figura 4)



Figura 4: Incêndio no depósito de rejeitos radioativos em Nevada (EUA)
Fonte: KTNV channel 13 Las Vegas

Já em 14 de fevereiro de 2014 ocorreu um incêndio na usina piloto de isolamento de resíduos radioativos (Transurânico) no Novo México (EUA). Houve uma explosão em um dos tambores contendo material radioativo. A principal causa do incêndio foi o uso de areia para gatos orgânica que foi utilizada para imobilizar os rejeitos ao invés da areia de argila.

Isso pode ter provocado uma reação química provocando o aquecimento do tambor e consequentemente a explosão. Figura 5



Figura 5: Tambor da usina piloto de isolamento no Novo México (EUA)
Fonte: SRNL (2015)

2.6.2 Extinção do incêndio

Para o surgimento do fogo é imprescindível que haja a união dos elementos: combustível, oxigênio e calor. A extinção do incêndio se dá quando um desses componentes é eliminado ou se interrompe o processo de reação em cadeia impedindo que o fogo continue. Os quatro métodos básicos de extinção são:

- **Resfriamento:** retirada ou diminuição do calor do material incendiado, até que o ponto que não libere mais vapores que reajam com o oxigênio impedindo o avanço do fogo. É o processo mais usado. Exemplo: o uso de água.

Em caso de material radioativo a utilização de água deve ser reduzida ao mínimo para evitar, na maioria dos casos, a extensão da contaminação de superfície e, em certos casos excepcionais, o risco de um acidente de criticalidade. De preferência, deverá ser utilizada água pulverizada em finíssimas partículas e apenas na quantidade necessária e suficiente para extinguir o incêndio. Vale ressaltar que a vaporização de água ocasiona uma diminuição da

temperatura e contribui para remover as poeiras do ar, reduzindo o perigo de contaminação atmosférica. O jato de água sob pressão não deve ser utilizado em instalações radiativas - salvo para resfriar as paredes externas dos locais afetados ou defendê-las contra um risco de propagação - uma vez que pode derrubar ou quebrar os recipientes ou envoltórios que contêm radionuclídeos, aumentando o risco de serem dispersos no ar ou na água. Sempre que possível, deve-se utilizar o pó químico ou o CO₂ como agentes extintores, ao invés da água ou da espuma. Contudo, deve se ter atenção ao fato do pó químico deixar resíduos, que podem estar contaminados.

- **Abafamento:** Constitui-se em reduzir ou impedir o contato do oxigênio com o material combustível. Sem a concentração suficiente de comburente, ou seja, nível de oxigênio menor que 15%, não haverá fogo. Exemplo: Cobertura do alvo em chamas, fechamento hermético do local, emprego de terra, areia e até mesmo supressão de oxigênio no ambiente. Esse método de extinção de incêndio possui ressalva em caso onde o material possui oxigênio em sua composição, como é o caso da pólvora e peróxidos orgânicos.

- **Isolamento:** Traduz-se na retirada, diminuição ou interrupção do material (combustível) não atingido pelo fogo, com suficiente margem de segurança, para fora do perímetro de propagação do fogo. Exemplo: Fechamento de válvulas de gás, retirada manual do material.

Em função das características do material radioativo envolvidos no incêndio, pode revelar-se mais urgente a proteção desses materiais do que a luta contra a propagação do fogo para outros edifícios de risco não nucleares.

- **Interrupção da reação química em cadeia:** consiste em utilizar determinadas substâncias que têm a propriedade de reagir com algum dos produtos intermediários da reação de combustão, evitando que mesma se complete totalmente. Pode-se impedir que materiais combustíveis e comburentes se combinem colocando-se materiais mais reativos e menos exotérmicos na queima. Exemplos: bicarbonato de sódio (extintor de PQS), bicarbonato de potássio, etc.

2.6.2 Segurança contra incêndios

Segundo Seito et al. (2008), internacionalmente, a Segurança Contra Incêndio (SCI) é observada como uma ciência, conseqüentemente uma área de pesquisa, desenvolvimento e ensino. É uma tendência internacional exigir que todos os materiais, componentes e sistemas construtivos, equipamentos e utensílios usados nas edificações, sejam testados do ponto de vista da SCI, o que pode ser observado em países como Estados Unidos, Japão e alguns países Europeus e, em menor intensidade, mas em clara evolução em outros países (Seito et al. 2008).

No Brasil existem instruções, normas e legislações técnicas que regulamentam a segurança contra incêndios. Sendo grande parte dessas normas originárias da National Fire Protection Association (NFPA) dos Estados Unidos. Já no âmbito nuclear a proteção contra incêndio utiliza como referência para implementar suas atividades, além dessas legislações técnicas aplicáveis às indústrias convencionais, existem as normas específicas que ficam a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e normas internacionais da NRC.

2.6.3 Proteção contra incêndio em instalações nucleares

Nas instalações nucleares a proteção contra incêndio tem por objetivo fundamental garantir que a segurança nuclear seja mantida. De acordo com a norma 1.04 (CNEN, 2015) a segurança nuclear pode ser entendida como o conjunto de medidas técnicas, operacionais e administrativas incluídas na fase de projeto, construção, manutenção e operação das instalações, objetivando evitar a ocorrência de acidentes e mitigar suas possíveis conseqüências.

A norma 2.04 (CNEN, 1997) “Proteção Contra Incêndios em Instalações Nucleares do Ciclo do Combustível”, estabelece critério e requisitos para proteção contra incêndio que visam prevenir a ocorrência, neutralizar a ação e minimizar os efeitos do incêndio sobre o material nuclear ou/e tóxico presente nas instalações nucleares do ciclo do combustível, com a intenção de evitar ou limitar aos níveis mais baixos possíveis os efeitos de radiação ionizantes

ou substâncias tóxicas, fato que na possibilidade de um eventual incêndio poderia ocorrer o comprometimento do material, ocasionando impacto direto na segurança nuclear, radiológica e ambiental da instalação.

Para garantir a segurança nuclear os sistemas são projetados de forma que o incêndio postulado para determinada área da instalação seja controlado, garantindo a possibilidade de operação dos sistemas de segurança mesmo na ocorrência de incêndios. Durante a execução do projeto é considerada a interferência do incêndio nos sistemas de segurança, sendo assim são consideradas medidas de proteção passivas (controle de materiais, meios de evacuação, compartimentação e proteção estrutural da edificação) e ativas (detecção do fogo, o alarme e a extinção manual ou automática) afim de garantir a operação segura da instalação.

Os principais aspectos de proteção contra incêndio, comuns a todas as instalações nucleares, são apresentados a seguir:

- Prioridade à prevenção contra incêndio;
- Verificação da viabilidade para a construção da instalação nuclear de forma que essa instalação não seja afetada por acidentes que ocorram em instalações vizinhas;
- Os processos e equipamentos devem ser dimensionados de modo que sejam os mais seguros possíveis, minimizando a possibilidade de incidência de fogo;
- Uma análise de segurança deve ser realizada para avaliar o risco de incêndio, incluindo diversas etapas como: identificação dos itens importantes para a segurança; levantamento dos tipos e quantidades de materiais combustíveis presentes; postulação dos incêndios cuja ocorrência é admissível e de que forma ele pode se propagar; cálculo dos parâmetros desse incêndio para cada zona (carga de incêndio, propagação de chama, taxa média de queima, duração, temperatura, severidade); verificação da adequação das barreiras corta-fogo previstas; avaliação da rapidez da resposta e da eficiência do desempenho dos recursos ativos de proteção previstos (sistemas de detecção e de extinção); e, análise dos efeitos do incêndio postulado sobre os itens importantes para a segurança nuclear;

- Um plano de proteção contra incêndio deve ser elaborado e constantemente atualizado, para cada instalação nuclear;
- Um programa de treinamento do pessoal de operação em proteção e combate a incêndio deve ser efetuado periodicamente;
- Alto grau de limpeza e ordem devem ser mantidos em cada instalação; e
- Brigada de incêndio devidamente equipada deve estar disponível em cada instalação nuclear.

2.6.1.1 Critérios de proteção em profundidade

O conceito de proteção em profundidade é uma ferramenta adotada para garantir um nível adequado de proteção contra incêndios. Também conhecida como lei de defesa em profundidade essa ferramenta assegura que uma falha, seja ela humana, ou de equipamentos não resultará em dano ao público, e ainda que haja uma combinação de falhas mesmo que seja pouco provável, as consequências ao público seriam mínimas ou nenhuma. A proteção em profundidade segue os seguintes níveis: (IAEA, 2017)

- Prevenção de incêndios
- Detecção e extinção rápida dos incêndios limitando os danos
- Confinamento do incêndio

Sobre a aplicação dos níveis de proteção em profundidade é importante observar que nenhum nível isoladamente deve ser considerado como perfeito, completo e suficiente, deve-se considerar que cada nível precisa atender seus requisitos específicos. Porém a intensificação de um nível pode compensar a deficiência do outro desde que demonstrado na análise de incêndio.

2.7 MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A modelagem da dispersão é a principal ferramenta para simular o processo de transporte de poluentes na atmosfera, sendo amplamente utilizados para auxiliar no monitoramento e controle da poluição do ar ocasionada pelas fontes emissoras existentes.

Existem diversas análises teóricas da dispersão de poluentes em escoamentos turbulentos, levando a diferentes tipos de modelos matemáticos. Tais modelos são desenvolvidos com o objetivo de melhorar a previsão e o entendimento da dispersão turbulenta atmosférica. Classificam estes modelos da seguinte forma: modelos estatísticos, modelos Gaussianos, modelos de similaridade e modelos de gradiente de transporte. (Hanna, 1982 *Apud* Homman, 2013)

Existem diferentes softwares que permitem a simulação de dispersão de materiais radioativos na atmosfera, entre eles o Screen View, ARTM, AERMOD, RASCAL, entre outros. O HotSpot, foi o software escolhido nesse trabalho, pois é um software amplamente utilizado para desenvolver simulações de liberação de material radioativo para atmosfera, e adota um modelo gaussiano de dispersão atmosférica.

O modelo gaussiano determina a concentração do dispersante em determinado ponto do espaço. A direção de transporte é dada pela direção do vento no ponto de liberação e assume-se que as condições atmosféricas, uma vez determinadas, são constantes. Os fenômenos de dispersão meteorológica e atmosférica que influenciam os padrões de contaminação são resumidos a seguir.

As equações do modelo Gaussiano estimam a concentração de um gás ou um aerossol em qualquer ponto do espaço, seguindo a equação:

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (9)$$

Se a opção de camada de inversão (L) estiver ativa, e σ_z exceder a altura de inversão, a equação a ser utilizada será a seguinte:

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y L u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{y x}{u}\right] DF(x) \quad (10)$$

Onde C = concentração atmosférica integrada no tempo Ci.s/m³, Q = atividade da fonte (Ci), H = altura efetiva de liberação (m), λ = constante de decaimento radioativo (s⁻¹), x = distância na direção do vento (m), y = distância na direção perpendicular ao vento (m), z = distância no eixo vertical (m), σ_y = desvio-padrão da distribuição da concentração integrada na direção perpendicular ao vento (m), σ_z = desvio-padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical (m), u = média da velocidade do vento na altura efetiva de liberação (m/s), L = altura da camada de inversão (m), DF(x) = fator de depleção da pluma.

Para evitar a transição aguda entre as duas equações acima, a transição para a equação da camada de inversão começa quando σ_z é igual a 70% de L e está completo quando σ_z é igual a L. Entre estes dois valores, as duas equações são interpoladas linearmente. (Homann, 2013)

3 METODOLOGIA

3.1 ESTUDO DE CASO

Os cenários de estudo referem-se à um incêndio em um depósito de rejeitos de baixo e médio nível de radiação, com as seguintes dimensões: 20 m de largura, com altura e comprimento de 15 m respectivamente. Para a localização desse depósito foi escolhida a opção de terreno padrão no HotSpot, segundo Homann (2013) este tipo de terreno geralmente produzirá estimativas mais conservadoras (dose de maior potencial).

Para simular os cenários do incêndio, adotou-se o modelo de dispersão atmosférica “General Fire”. Esse modelo permite criar uma mistura de radionuclídeos e inserir como o termo fonte. Portanto, foi criada uma mistura contendo vários radionuclídeos, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Inventário de radionuclídeos.

Rejeitos Compactados para 700 tambores		Rejeitos Imobilizados (resina exaurida) para 1000 tambores	
Radionuclídeo	Atividade (Bq)	Radionuclídeo	Atividade (Bq)
⁵⁸ Co	2,80E+11	⁵⁴ Mn	3,00E+12
⁶⁰ Co	2,10E+12	⁵⁸ Co	4,00E+12
¹³⁴ Cs	2,10E+11	⁶⁰ Co	2,00E+13
¹³⁷ Cs	1,05E+12	⁶³ Ni	2,00E+13
⁵⁴ Mn	1,75E+11	⁶⁵ Zn	6,00E+11
¹²⁴ Sb	1,40E+11	⁹⁰ Sr	4,50E+11
⁵⁹ Fe	7,00E+10	⁹⁰ Y	4,50E+11
⁹⁵ Zr	1,05E+11	^{110m} Ag	1,00E+12
		¹²² Sb	3,50E+12
		¹²⁴ Sb	1,00E+13
		¹²⁵ Sb	5,50E+12
		¹³⁴ Cs	1,00E+13
		¹³⁷ Cs	6,00E+13
		^{137m} Ba	6,00E+10

Durante a criação dessa mistura foram adotados os seguintes parâmetros para o modelo de dispersão “General Fire”, considerando o inventário a ser liberado (Tabela 6). No cenário **1** há uma liberação de apenas 1% do inventário total e foi considerado que desses 1% apenas 5% foi respirado pelo público, já no cenário **2**, **3** e **4** houve a liberação de 10%, 50% e 100% do inventário total respectivamente, sendo considerado a respiração de 100% do material liberado por cada cenário.

Tabela 6: Dados para simulação no HotSpot.

	Parâmetros do HotSpot	CENÁRIOS			
		1	2	3	4
	Fração Transportada pelo Ar (ARF)	0,01	0,1	0,5	1,00
	Fração Respirável (RF)	0,05	1,00	1,00	1,00
Valores de Default	Taxa de danos (DR)	1,00	1,00	1,00	1,00
	Fator de fuga (LF)	1,00	1,00	1,00	1,00
	Velocidade de deposição respirável (cm/sec)	0,3	0,3	0,3	0,3
	Velocidade de deposição não-respirável (cm/sec)	8,00	8,00	8,00	8,00

Com a caracterização do depósito definida, o próximo passo foi inserir a configuração para a simulação do incêndio (Tabela 7). Esses dados são a base para três simulações em diferentes condições atmosférica e de liberação do inventário.

As classificações atmosféricas assumidas nessa simulação baseiam-se nas categorias de estabilidade atmosférica de Pasquill, consideradas no HotSpot, assim, têm-se as seguintes condições atmosféricas:

- a) CLASSE A - Sol alto no céu, velocidade do vento de 2m/s;
- b) CLASSE D - Sol baixo ou nuvens no céu, velocidade do vento de 6m/s;
- c) CLASSE F - Período Noturno, velocidade do vento de 1m/s.

Tabela 7: Parâmetros principais da simulação do incêndio.

Dados de entrada no HotSpot	
Altura física do fogo	7 m
Raio de liberação	20 m
Altura da nuvem	20 m
Terreno	Standard (Padrão)
Altura de referência do vento	10 m
Direção do vento	Oeste para Leste
Tempo de amostra	10 min
Fator de conversão de Dose	FGR 13

Diante desses dados, a proposta desse trabalho é realizar simulações de um cenário de incêndio em um depósito rejeitos radioativos, considerando a modelagem de dispersão atmosférica que será gerada pelo HotSpot. Onde é obtida a dose efetiva total (TED) a ser utilizada para calcular o risco radiológico ao qual os profissionais e a população envolvida estarão submetidos. E para o cálculo desse risco é utilizado um modelo disponibilizado pelo Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR V, 1990) para cálculo de câncer radioinduzido.

3.2 SOFTWARE HOTSPOT

Segundo Homann (2013), o HotSpot Health Physics Codes é uma ferramenta computacional que fornece uma aproximação de primeira ordem dos efeitos da radiação associados a liberação atmosférica de materiais radioativos. Desenvolvido pelo laboratório Lawrence Livermore National Laboratory – LLNL, tem como objetivo equipar o pessoal e planejadores de atendimento a emergências com um conjunto de ferramentas metodológica

computacional rápida e portátil para avaliar incidentes envolvendo material radioativo. Esse software também é usado para análise de segurança em instalações que manipulam material radioativo. (Homman, 2013)

Os códigos são uma estimativa dos efeitos da radiação associados a liberação atmosférica de material radioativos. O HotSpot utiliza um modelo semi-empírico gaussiano para calcular a dispersão do material radioativo em relação ao deslocamento do vento na área impactada, dependendo principalmente das condições climáticas. O modelo gaussiano como descrito anteriormente, determina a concentração do material radioativo dispersado em determinado ponto do espaço. A direção do transporte é estabelecida de acordo com a direção do vento predominante na área da liberação, assim assume-se que as condições climáticas estabelecidas permanecem constante. O software oferece uma interface amigável, a principal tela disponibiliza modelos de dispersão atmosférica que podem ser utilizados para realizar as simulações. Figura 6

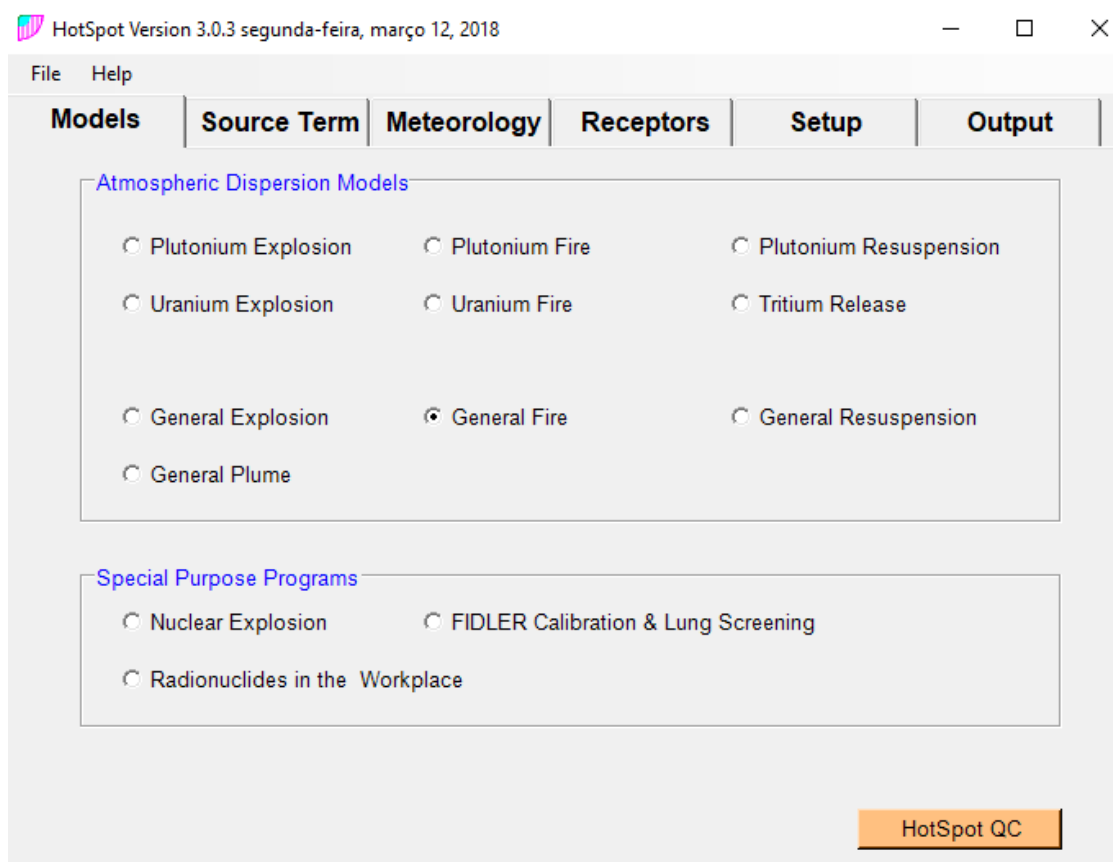


Figura 6: Tela de interface doHotSpot
Fonte: HotSpot 3.0.3

Após a escolha do modelo de dispersão, há possibilidade de abrir um cenário salvo, exemplos de cenários disponibilizados pelo software ou iniciar a construção de um novo cenário, para isso é necessário a escolha de um radionuclídeo ou criar sua própria mistura. Em seguida a navegação é dada pelas outras guias: Termo Fonte, Meteorologia, Receptores, Configuração e a guia de Saída. Os critérios padrão baseados em dados típicos para cada um dos modelos de dispersão já estão inclusos no HotSpot. No entanto esses valores podem ser alterados de acordo com a necessidade do usuário.

3.2.1 Classificação de estabilidade atmosférica

As condições meteorológicas influenciam diretamente na dispersão do radionuclídeo, o HotSpot permite selecionar as condições de estabilidade atmosférica.

Reconhecendo a necessidade de uma forma mais simplificada para definir a estabilidade atmosférica baseada em análises meteorológicas comuns como, a velocidade do vento, a intensidade de radiação solar e cobertura de nuvens, Pasquill (1961) propôs o conceito de classes de estabilidade, que provaram ser muito úteis nos cálculos de dispersão atmosférica que utilizam o modelo de pluma gaussiana. Baseado nas classes de estabilidade de Pasquill, Gifford (1961) desenvolveu as correspondências mais amplamente utilizadas para determinar os coeficientes de dispersão, conhecidas como as curvas de Pasquill-Gifford que relacionam σ_y e σ_z (coeficientes de dispersão horizontal e vertical respectivamente) com a distância da fonte e com a classe de estabilidade.

Os meteorologistas distinguem os estados gerais da camada superficial atmosférica em: (instável, neutra e estável). Essas categorias referem-se a como uma parcela de ar reage quando deslocada adiabaticamente na direção vertical. O HotSpot permite que você selecione a classificação de estabilidade atmosférica de duas maneiras: com base na entrada de dados feita pelo usuário através de observações diretas ou os usuários podem selecionar e forçar diretamente uma classificação de estabilidade específica. O método simplificado requer a seleção do fator de insolação solar e da velocidade do vento no solo (altura de 2 m). O HotSpot determina automaticamente a categoria de estabilidade atmosférica da matriz na tabela a seguir (Tabela 8). Esta tabela contém critérios para as seis classes de estabilidade,

com base nas categorias de insolação solar. O esquema é amplamente utilizado na meteorologia e é aceito para estimativas da classe de estabilidade. (Homann, 2013)

Tabela 8: Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F (Homann, 2013).

Velocidade do vento no solo (m/s)	Sol alto no céu	Sol baixo ou nuvens no céu	Noturno
< 2	A	B	F
2 – 3	A	C	E
3 – 4	B	C	D
4 – 6	C	D	D
> 6	C	D	D

O desvio-padrão na direção do vento horizontal está relacionado com as Categorias de Estabilidade Atmosférica de Pasquill, admitido como um sistema de classificação recomendado pela Nuclear Regulatory Commission (*NCR*) e definido como segue (notação Pasquill-Gifford): (a) **A** Muito Instável ($\sigma\theta = 25^\circ$), (b) **B** Moderadamente Instável ($\sigma\theta = 20^\circ$), (c) **C** Pouco Instável ($\sigma\theta = 15^\circ$), (d) **D** Neutro ($\sigma\theta = 10^\circ$), (e) **E** Moderadamente Estável ($\sigma\theta = 5^\circ$) e (f) **F** Muito Estável ($\sigma\theta = 2.5^\circ$).

Uma vez determinada a categoria de estabilidade atmosférica, o HotSpot utiliza as equações apresentadas na Tabela 9 e 10 para estimar σ_y e σ_z para dois tipos de terreno - Padrão e Cidade. O tipo de terreno cidade (área urbana) explica a maior dispersão de plumas em estruturas com as características de retenção de calor de superfícies, como asfalto e concreto. Também estimará concentrações mais baixas do que o tipo de terreno Padrão, devido ao aumento da dispersão de grandes estruturas e materiais urbanos. (Homann, 2013)

O modelo mais utilizado e que se adapta melhor às situações abordadas pelo HotSpot é o modelo de *Briggs*, para o cálculo do coeficiente de dispersão vertical em função da distância x . Esse considera um valor diferente para cada classe de estabilidade atmosférica e possibilita cálculo para áreas urbanas ou padrão.

Tabela 9: Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno padrão (Homann, 2013).

Classe de Estabilidade	σ_y (m)	σ_z(m)
A	$\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	0,20x
B	$\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	0,12x
C	$\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,080x}{\sqrt{1 + 0,0002x}}$
D	$\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,060x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$
E	$\frac{0,66x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,030x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$
F	$\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,016x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$

Tabela 10: Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno urbano (Homann, 2013).

Classe de Estabilidade	σ_y (m)	σ_z(m)
A-B	$\frac{0,32x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$\frac{0,24x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$
C	$\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	0,20x
D	$\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$\frac{0,14x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$
E-F	$\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$

Visando uma opção mais conservadora, considerando as situações mais graves, foi definida para essa simulação a aproximação para o terreno padrão.

3.3 MODELO BEIR V

O BEIR V (1990) é o quinto relatório da série. Elaborado pelo National Research Council's Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR) o relatório

aborda os efeitos da exposição à baixas doses radiação sobre a saúde de populações. Esse relatório busca apresentar a melhor descrição que possa ser apresentada sobre o risco de câncer resultante de uma dose especificada de radiação ionizante.

O câncer é uma doença complexa e não totalmente compreendida. O risco depende de o tipo particular de câncer; a idade e o sexo da pessoa exposta; a magnitude da dose para um órgão em particular; a qualidade da radiação; e a natureza da exposição, seja breve ou crônica, depende também da presença de fatores como a exposição a outros agentes cancerígenos e promotores que possam interagir com o radiação; características individuais que não podem ser especificadas, mas que pode ajudar a explicar por que algumas pessoas desenvolvem câncer e outras não, mesmo quando expostos de forma semelhante.

Com o intuito de fornecer modelos mais precisos para estimar o risco de câncer induzido por radiação, o comitê responsável pelo BEIR V optou por um compromisso de tratar apenas de cânceres das vias respiratórias, mama, aparelho digestivo e tireoide separadamente. (BEIR V, 1990)

Sendo a intenção desse trabalho estimar o risco relativo, segundo Wagner (1998) risco relativo é a medida de força da associação entre um fator de risco e o desfecho de um estudo epidemiológico, e definido como sendo a razão entre a incidência de indivíduos expostos pela incidência não exposta. Esse risco é usualmente usado em estudo de coorte. Para calcular o risco relativo desse caso, foi utilizado o modelo de risco de câncer no sistema respiratório, esse modelo foi adotado com a intenção de relacionar um caso de incêndio, onde há dispersão de material radioativo e a possível consequência da inalação desse material. O modelo é disponibilizado pelo BEIR V é um modelo de risco relativo linear, ou seja, o risco tende a aumentar com o aumento à exposição, esse modelo foi obtido por ajustes do LSS (Life Span Study), conforme apresentado na IAEA (1996), para homens e mulheres respectivamente:

$$RR = 1 + \alpha_1 D \exp \left(\beta_1 \log_e \left(\frac{T}{20} \right) \right) \quad (11)$$

$$RR = 1 + \alpha_1 D \exp \left(\beta_1 \log_e \left(\frac{T}{20} \right) + \beta_2 \right) \quad (12)$$

Onde, $\alpha_1 = 0,636$, $\beta_2 = 0,711$ e T = anos após a exposição. De acordo com a comissão responsável pelo BEIR V, o risco relativo deste site diminui com o tempo de exposição, sendo o coeficiente de exposição $\beta_1 = -1.437$

O BEIR V considera as seguintes três fontes principais de dados epidemiológicos sobre a indução de câncer de pulmão humano por radiação:

- I. Os sobreviventes de explosões de bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki;
- II. pacientes tratados com raios X para espondilite anquilosante;
- III. mineiros de urânio e outros mineiros subterrâneos expostos cronicamente a radiação LET (alfa) de inalação ^{222}Rn e sua progênie.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SIMULAÇÃO DO INCÊNDIO NO HOTSPOT

4.1.2 Curvas de Isodoses

As curvas de isodoses a seguir são geradas pelo HotSpot após a inserção dos dados pertinentes as simulações. Para as condições de contorno das curvas de isodoses, interna, média e externa, adotou-se os valores para TED de 10 mSv, 5 mSv e 1 mSv respectivamente para todas as classes de estabilidades simuladas.

CENÁRIO 1

A curva de contorno para classe A interna apresenta uma TED máxima de $1,0E-05$ Sv em uma distância de $0,017 \text{ km}^2$, já a curva média apresenta a TED máxima de $1,0E-06$ Sv numa distância de $0,19 \text{ Km}^2$ e a curva externa uma TED máxima de $1,0E-07$ Sv em $1,9 \text{ Km}^2$. (Figura 7).

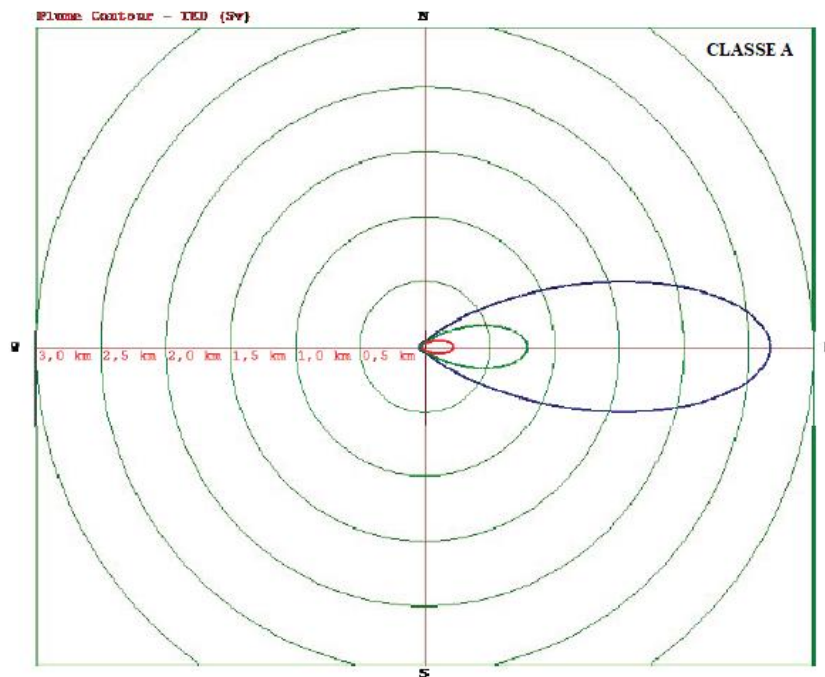


Figura 7: Curvas de isodotes para Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Na classe D a curva de isodose interna apresenta uma TED máxima de $1,0E-05$ Sv, já para a curva média a TED de $1,0E-06$ Sv em uma distância de $0,34$ Km² e a curva externa uma TED máxima de $1,0E-07$ Sv numa distância de $6,4$ Km². Figura 8

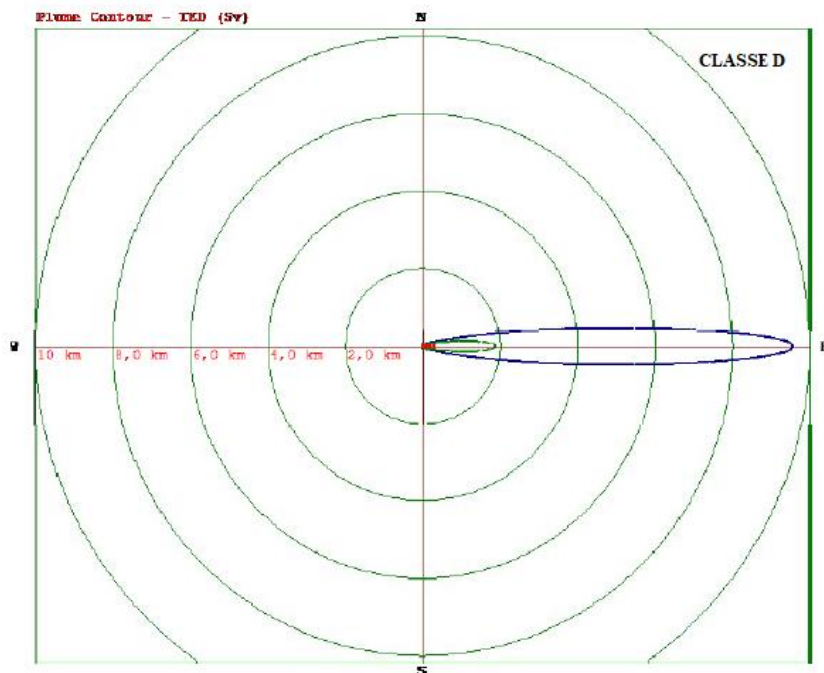


Figura 8: Curvas de isodotes para Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para classe F a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de $1,0E-04$ Sv em $3E-03$ Km², para a curva média têm-se a TED máxima de $1,0E-05$ Sv numa distância de $0,31$ Km² já a curva externa apresenta a TED máxima de $1,0E-06$ Sv em uma distância de $7,3$ Km². Figura 9

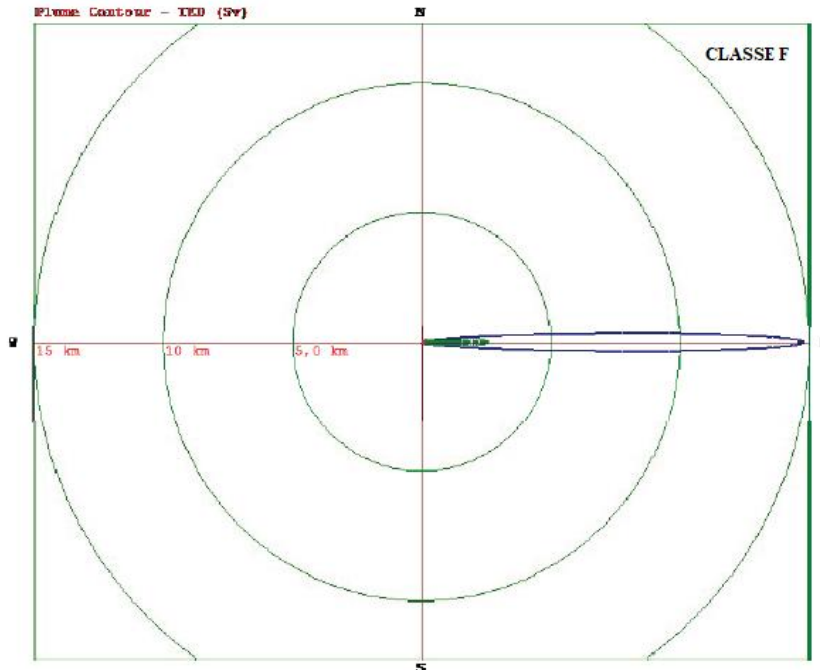


Figura 9: Curvas de isodoses para Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

CENÁRIO 2:

Na Classe A curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 10 mSv em uma distância de $6E-04$ km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de $0,003$ Km² e a curva externa uma TED máxima de 1 mSv em $0,027$ Km². Figura 10

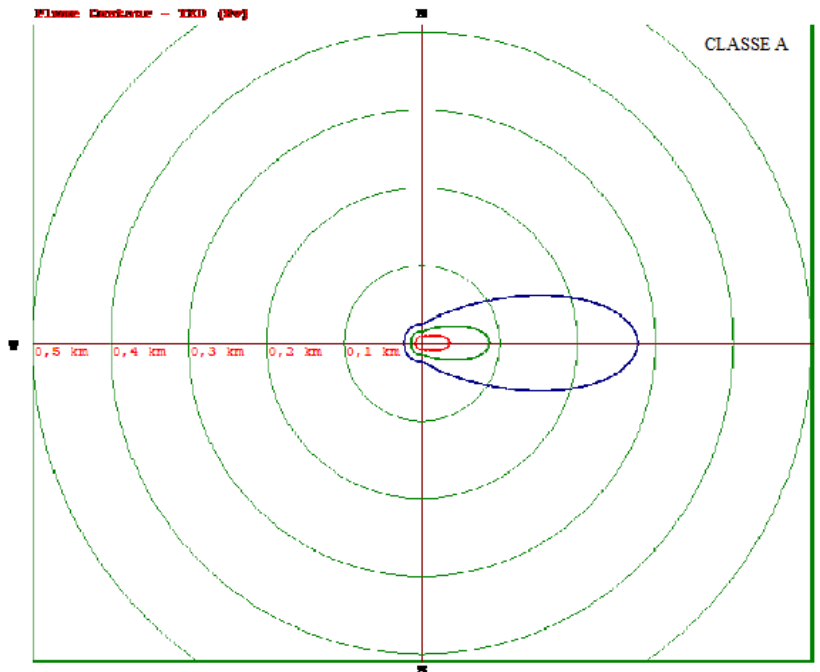


Figura 10: Curvas de isodotes para Classe A
 Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a classe D, a curva externa uma TED máxima de 1 mSv numa distância de 0,025 Km². Nesse gráfico o software considerou apenas curva externa para plotagem pois foi a única que excedeu o limite de contorno. Figura 11

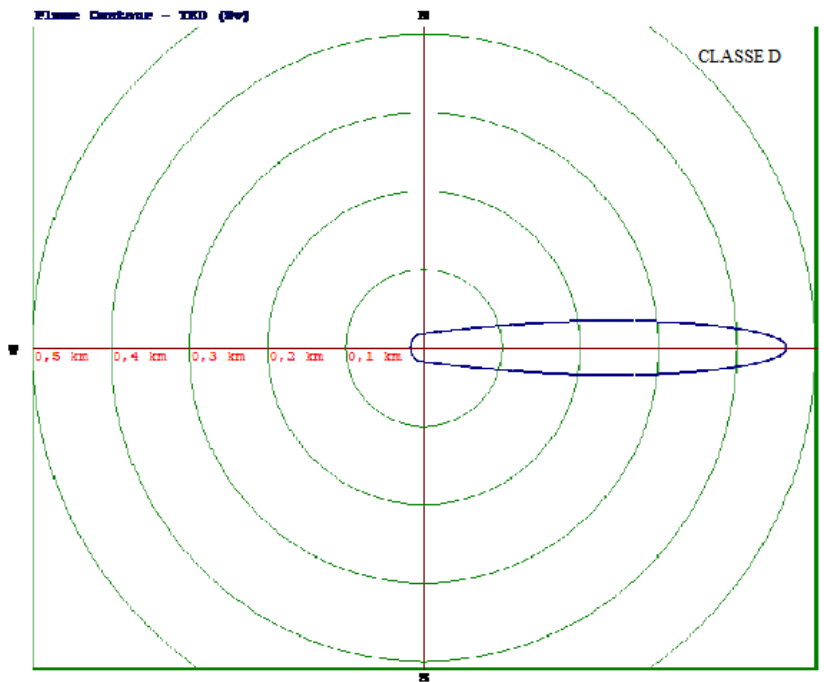


Figura 11: Curvas de isodose para Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Na classe F a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 10 mSv em uma distância de 0,012km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 0,063 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 0,02 Km². Figura 12

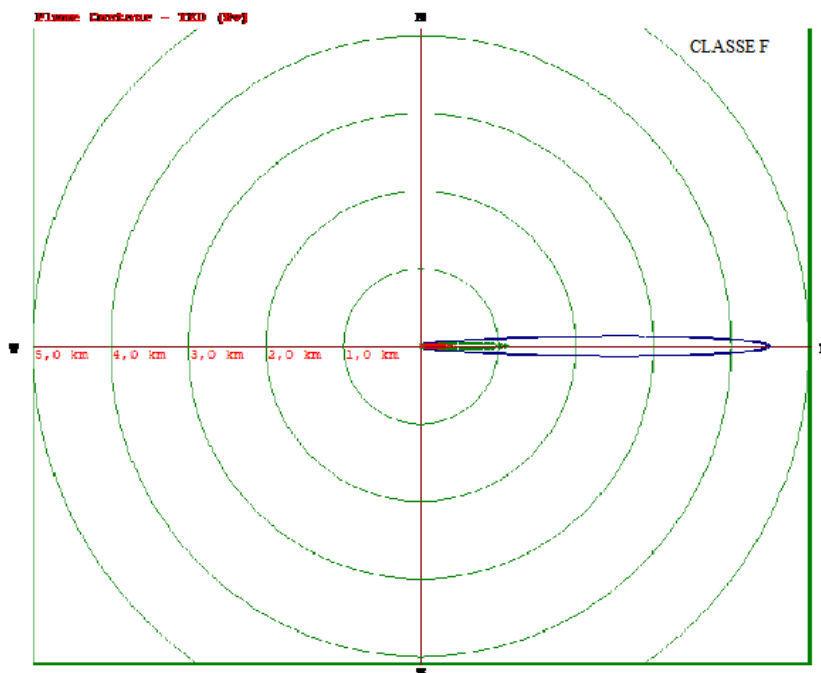


Figura 12: Curvas de isodose para Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

CENÁRIO 3:

A curva de contorno interna classe A, apresenta uma TED máxima de 10 mSv em uma distância de 0,012 km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 0,027 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 0,14 Km². Figura 13

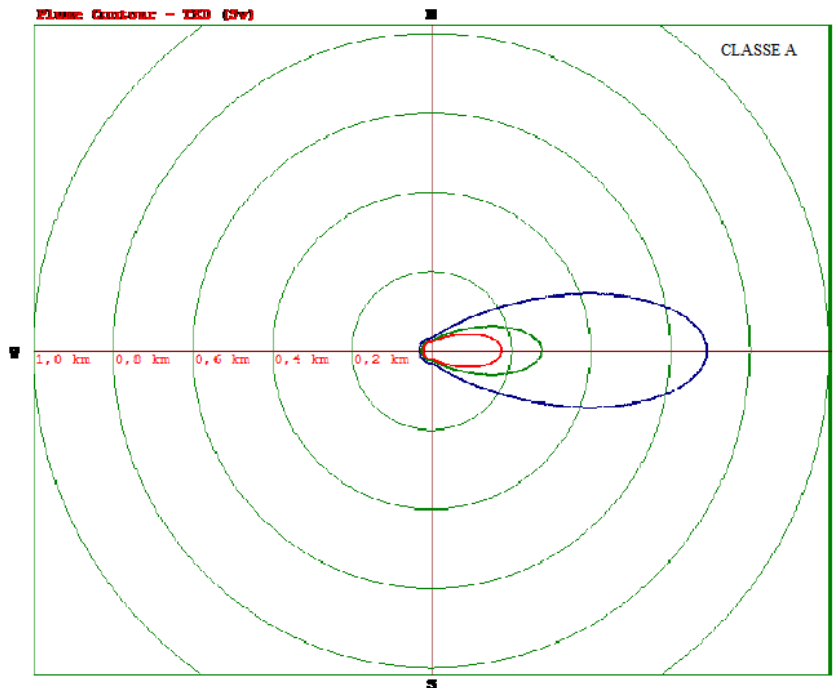


Figura 13: Curvas de isodotes para Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a classe D, a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 10 mSv em uma distância de 0,007 km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 0,025 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 0,25 Km². Figura 14

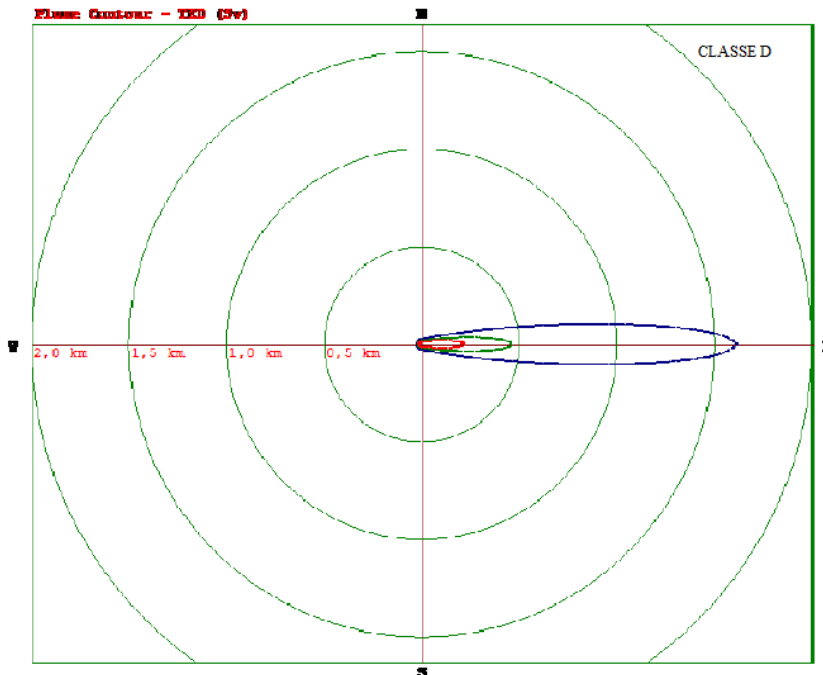


Figura 14: Curvas de isodoses para Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a classe F, a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 10 mSv em uma distância de 0,30km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 0,082 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 7,3 Km². Figura 15

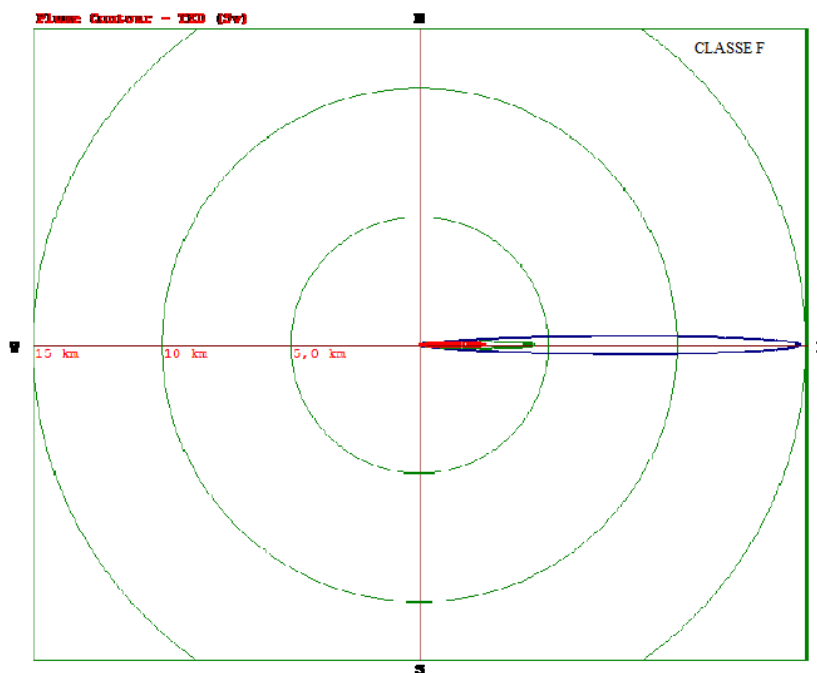


Figura 15: Curvas de isodoses para Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

CENÁRIO 4:

Na Classe A, a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 0,010 Sv em uma distância de 0,027 km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 0,056 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 0,29 Km². Figura 16

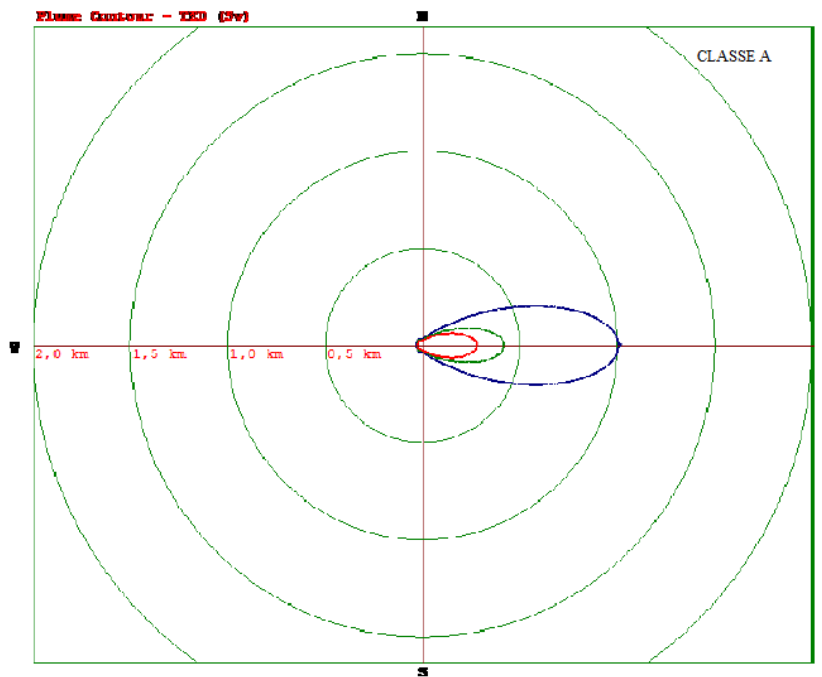


Figura 16: Curvas de isodotes para Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Já para a classe D, a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 10 mSv em uma distância de 0,025km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 0,071 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 0,61 Km². Figura 17

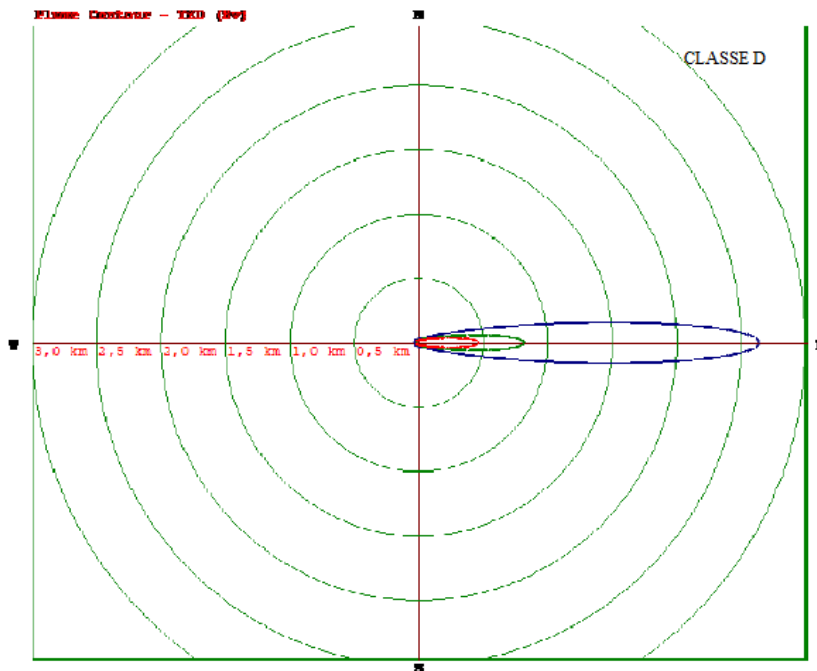


Figura 17: Curvas de isodose para Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Na classe F, a curva de contorno interna apresenta uma TED máxima de 0,010 Sv em uma distância de 0,82km², já a curva média apresenta a TED máxima de 5 mSv numa distância de 2,2 Km² e a curva externa uma TED máxima de 1mSv em 17 Km². Figura 18

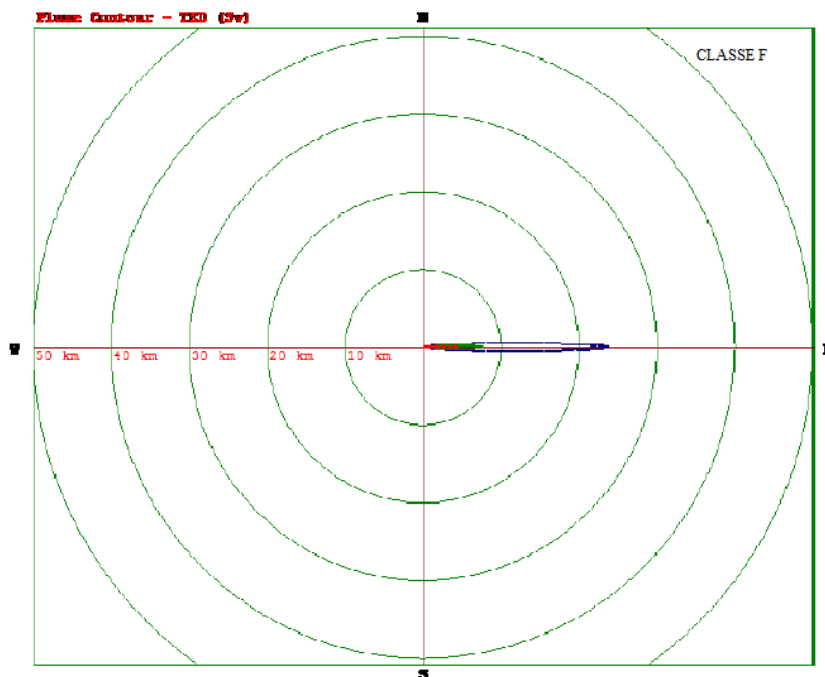


Figura 18: Curvas de isodose para Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

Analisando as curvas de isodoses observa-se que o cenário 1, onde foi considerado que apenas 1% do inventário total é dispersado na atmosfera e desse inventário somente 5% é respirado pelo público, apresentou as doses bem abaixo dos limites de contorno adotados na simulação. Já a partir do segundo cenário há um aumento considerável dos limites de dose, chegando a limitação dos valores de contorno, variando apenas a distância das curvas de acordo com a classe de estabilidade atmosférica, sendo a Classe F a que alcançou maiores distância para ambos cenários de maneira crescente, ou seja, quanto maior a quantidade de material liberado, maior foi a distância das curvas de isodoses.

4.1.3 Linha de centro da pluma

O HotSpot ainda fornece uma estimativa da dose efetiva total (TED) em função da distância para cada condição de estabilidade atmosférica. Portanto, os cenários de incêndio geraram os seguintes gráficos da pluma para as três classes de estabilidade atmosférica.

CENÁRIO 1:

A pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 1 resultou em uma TED máxima de 0,0981 mSv para uma distância 10 metros. Figura 19

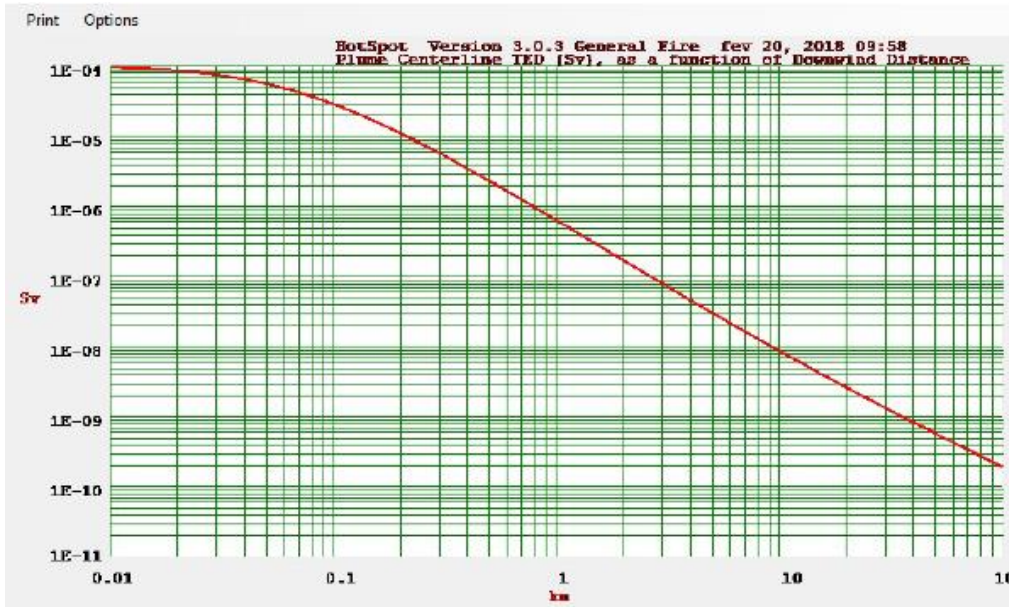


Figura 19: TED em função da distância. Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 1 obteve-se a TED máxima de 0,0299 mSv para uma distância de 10 metros. Figura 20

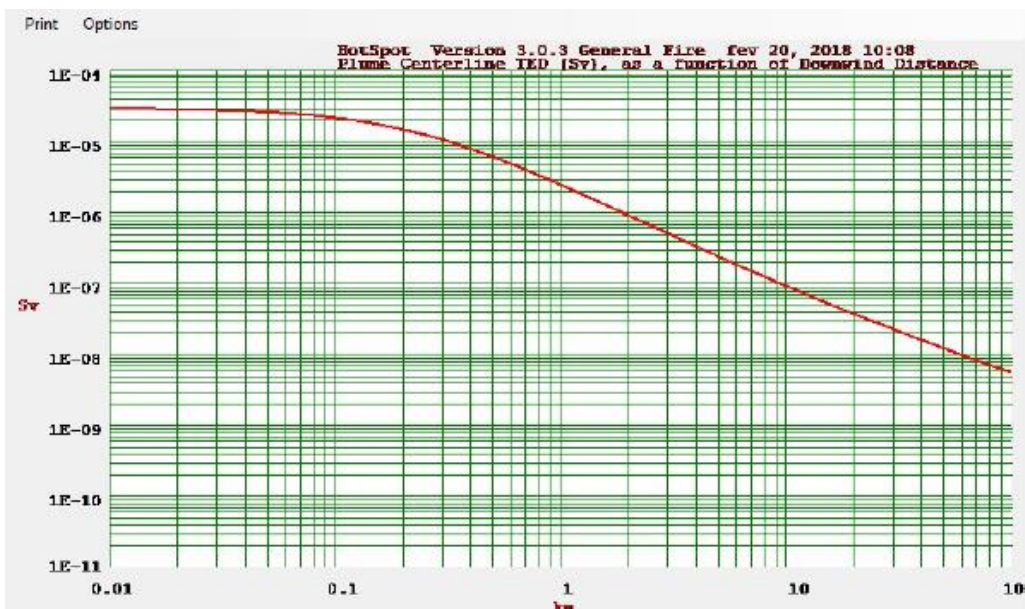


Figura 20: TED em função da distância. Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 1 obteve-se a TED máxima de 0,144 mSv, para uma distância de 10 metros. Figura 21

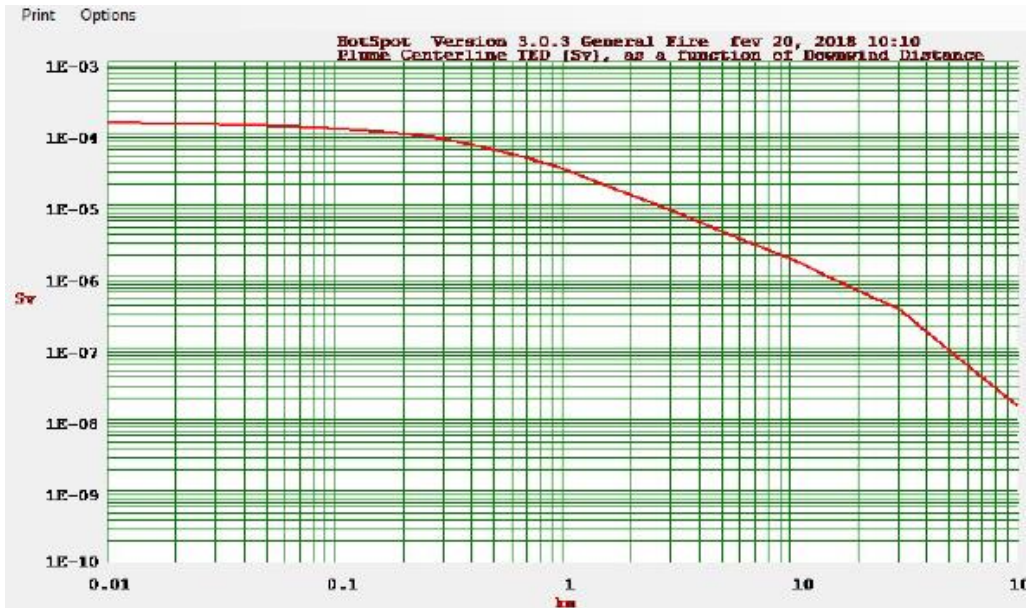


Figura 21: TED em função da distância. Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

CENÁRIO 2:

A pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 2 resultou em uma TED máxima de 13 mSv para uma distância 10 metros. Figura 22

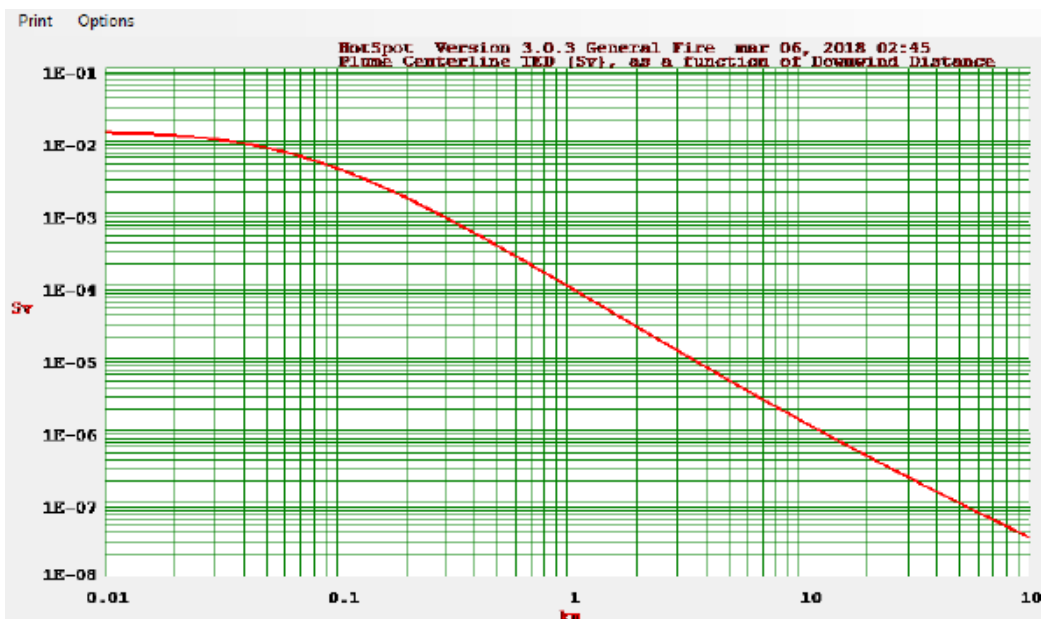


Figura 22: TED em função da distância. Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 2 obteve-se a TED máxima de 4,14 mSv para uma distância de 10 metros. Figura 23

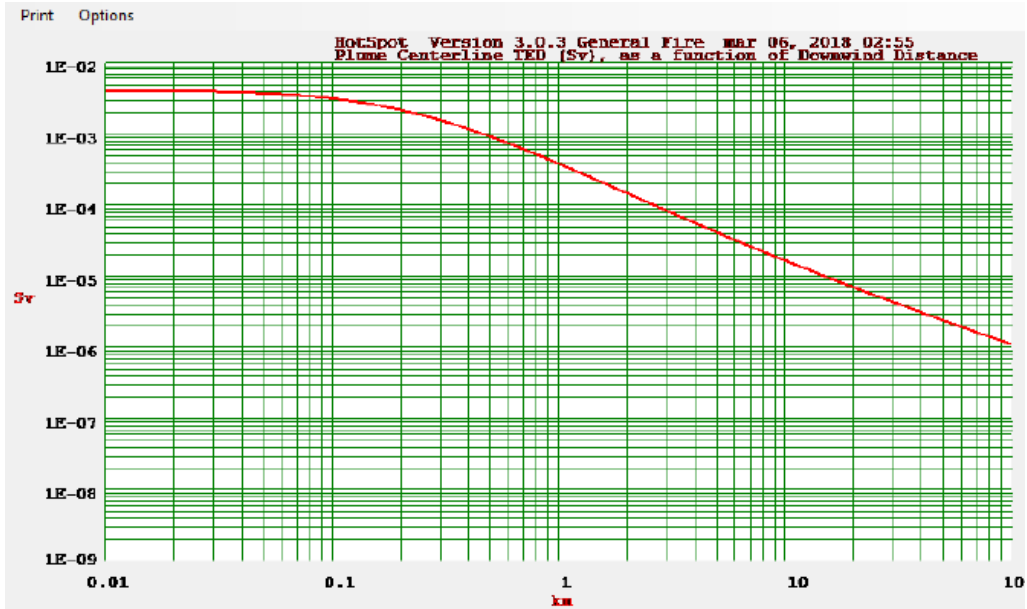


Figura 23: TED em função da distância. Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 1 obteve-se a TED máxima de 20 mSv, para uma distância de 10 metros. Figura 24

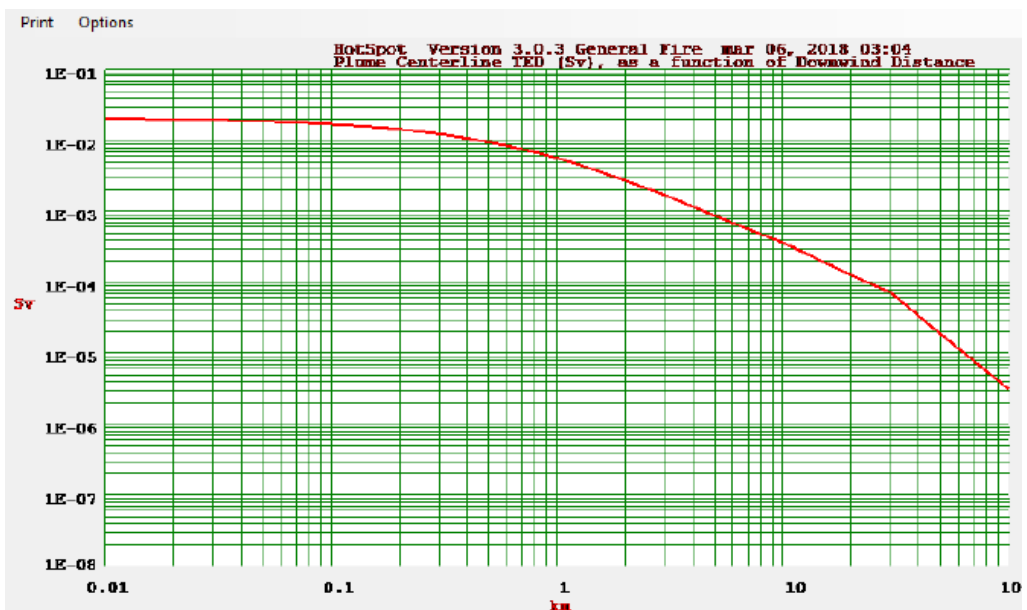


Figura 24: TED em função da distância. Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

CENÁRIO 3:

A pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 3 resultou em uma TED máxima de 66 mSv para uma distância 10 metros. Figura 25

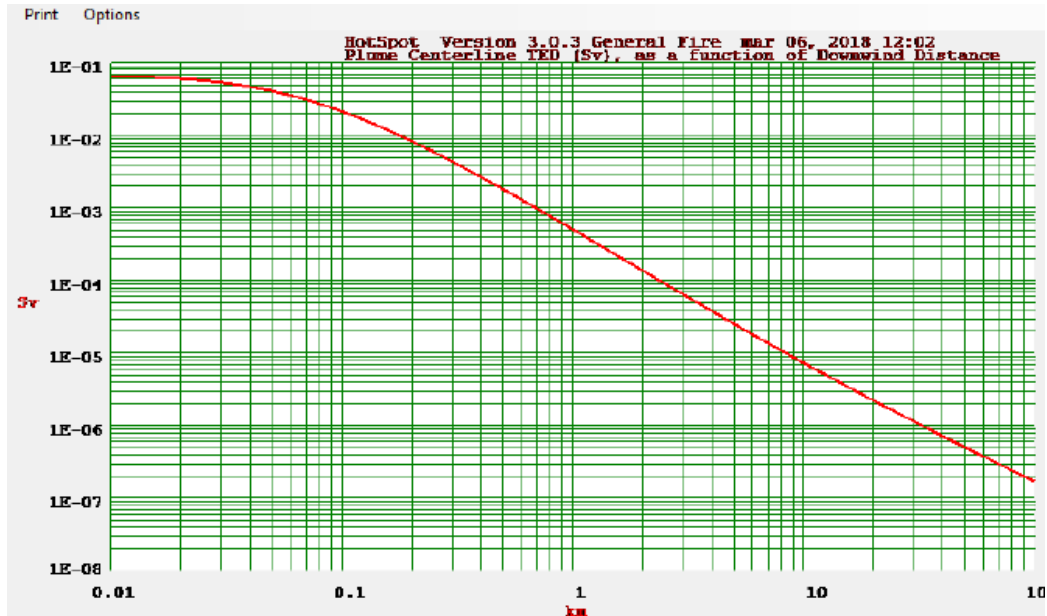


Figura 25: TED em função da distância. Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 3 obteve-se a TED máxima de 21 mSv para uma distância de 10 metros. Figura 26

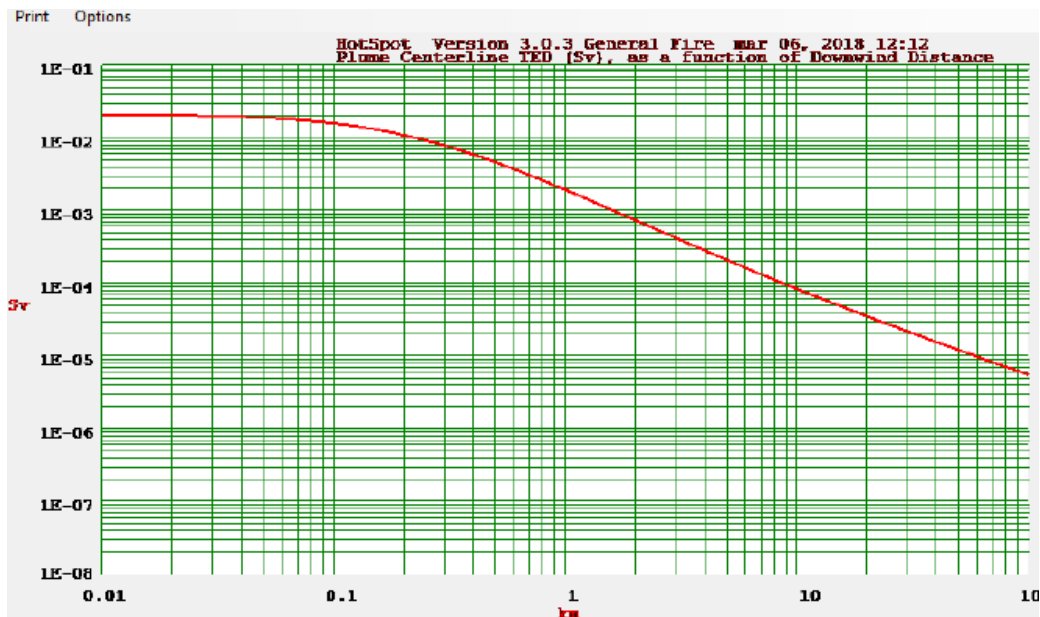


Figura 26: TED em função da distância. Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 1 obteve-se a TED máxima de 101 mSv, para uma distância de 10 metros: Figura 27

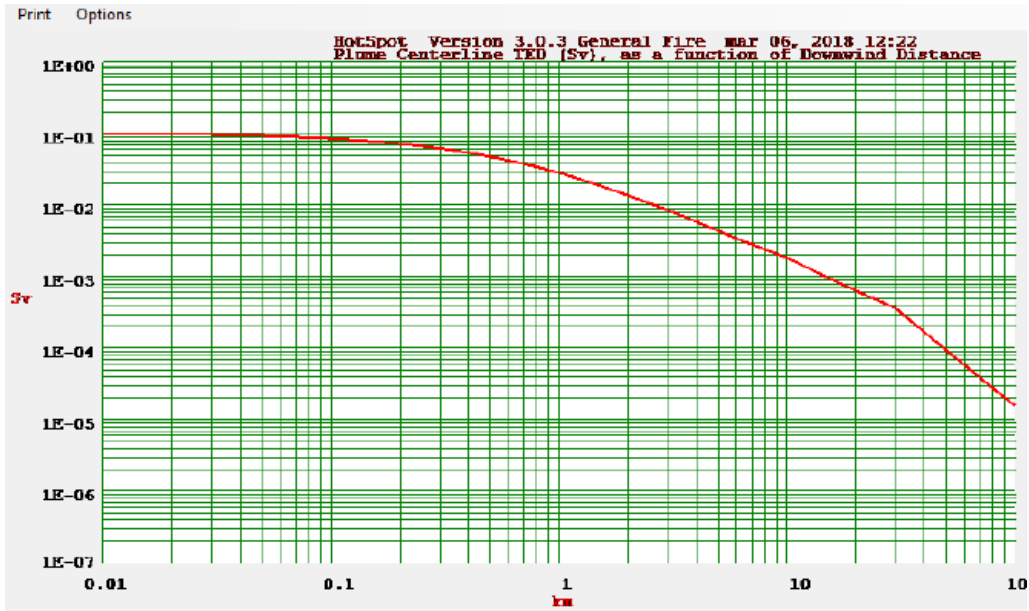


Figura 27: TED em função da distância. Classe F
Fonte: HotSpot 3.0.3

CENÁRIO 4:

A pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 4 resultou em uma TED máxima de 131 mSv para uma distância 10 metros. Figura 28.

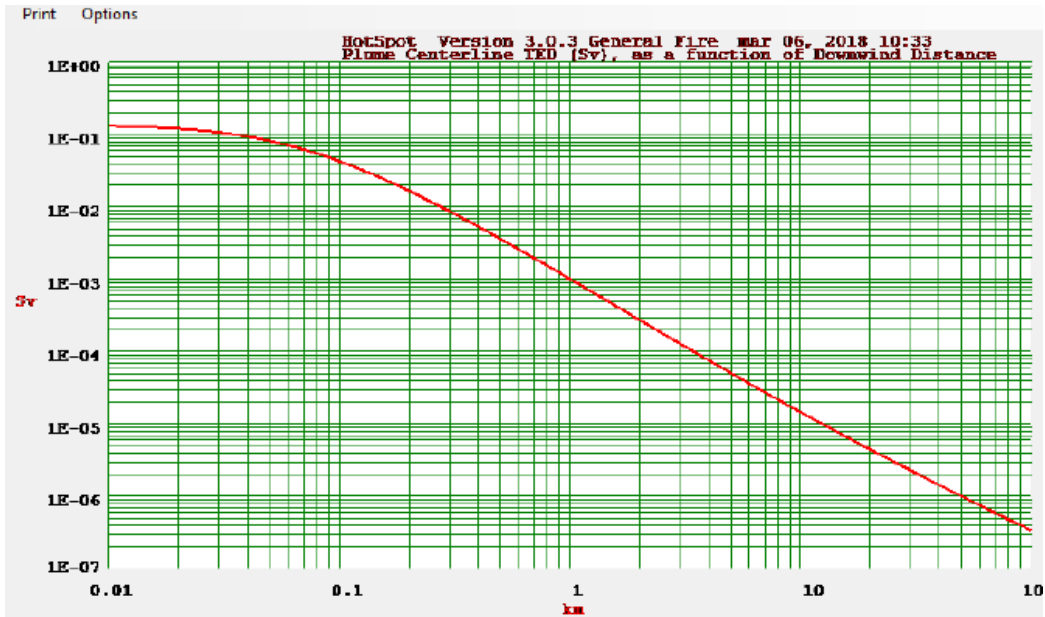


Figura 28: TED em função da distância. Classe A
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 4 obteve-se a TED máxima de 41 mSv para uma distância de 10 metros. Figura 29

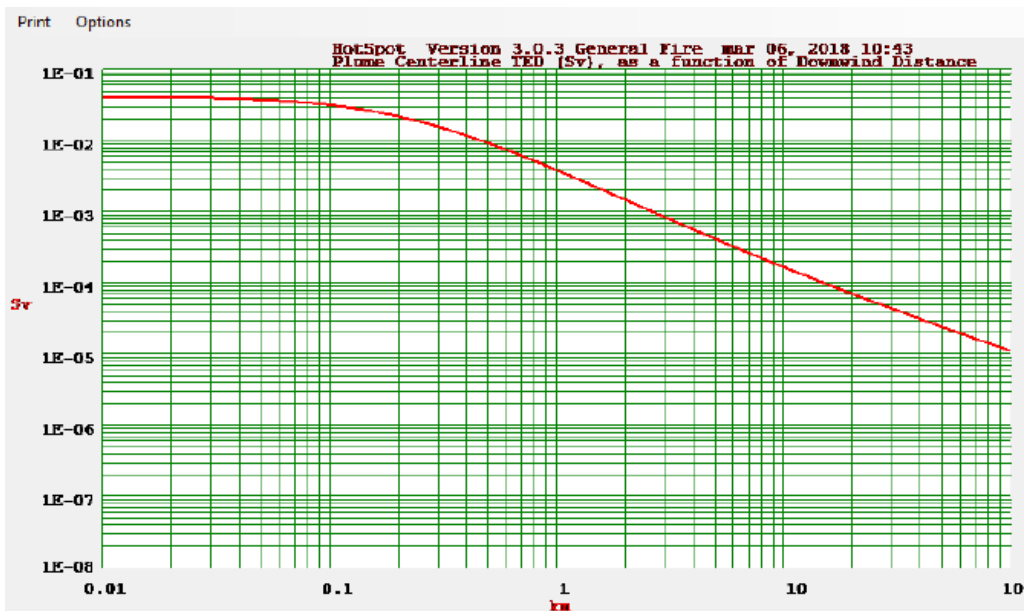


Figura 29: TED em função da distância. Classe D
Fonte: HotSpot 3.0.3

Para a pluma de dispersão atmosférica referente ao cenário 1 obteve-se a TED máxima de 203 mSv, para uma distância de 10 metros. Figura 30

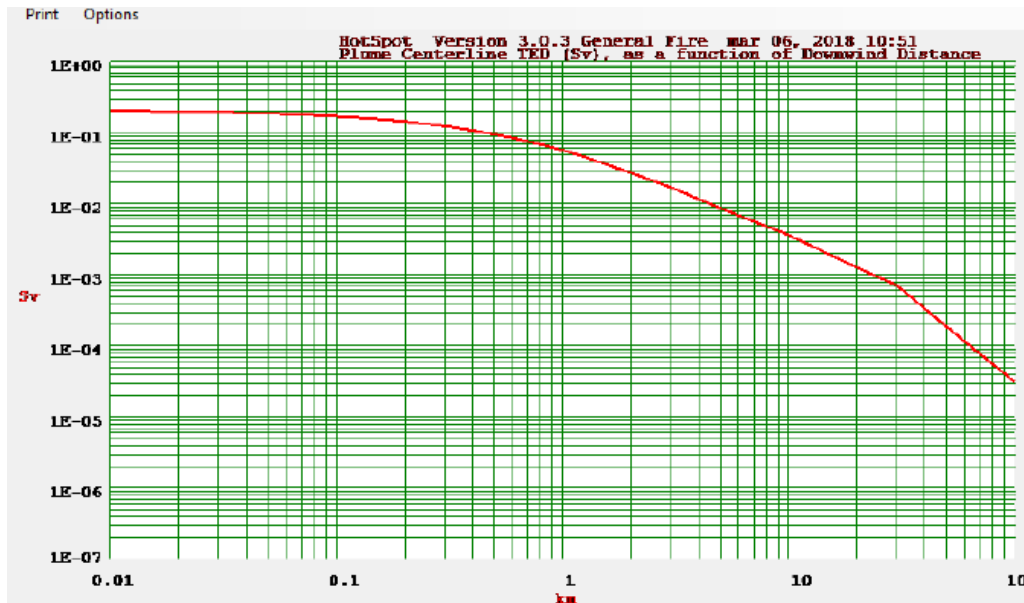


Figura 30: TED em função da distância. Classe F
 Fonte: HotSpot 3.0.3

Observando os gráficos acima nota-se que a classe de estabilidade atmosférica A, considerada moderadamente instável apresentou os menores valores de dose para ambas classes. As condições atmosféricas da classe A favoreceram a dispersão do material radiológico diminuindo a sua concentração em um determinado ponto. Entretanto nas classes D e principalmente na Classe F que é considerada a classe moderadamente estável, houve um aumento nos valores de doses devido a maior concentração do material radioativo, resultado da condição atmosférica mais estável, o que dificulta a dispersão do material radioativo. Dentre os resultados da pluma de dispersão obtidos nas simulações pode-se observar que apenas as Classes A e D do cenário 1 apresentam valores de dose inferior aos valores dispostos na norma 3.01 (CNEN, 2014a). Porém na Classe F do cenário 1 há uma TED máxima de 0,144 mSv, dose superior ao limite permitido para o público, assim como as doses do Cenário 2 para as classes A, D e F, contudo os valores de doses nesses cenários ainda estão dentro dos limites aceitáveis para os trabalhadores ocupacionalmente expostos. Já nas classes dos demais cenários os valores de dose extrapolaram o limite de dose recomendável para o público em geral e para os trabalhadores ocupacionalmente expostos.

4.2 CÁLCULO DO RISCO RADIOLÓGICO

As estimativas de dose equivalente para determinados órgãos também são disponibilizados pelo HotSpot, inclusive para o pulmão, objeto de estudo desse trabalho. Elas são utilizadas para determinar o risco radiológico de câncer no sistema respiratório. (Tabela 11)

Tabela 11: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 1

Dados de saída HotSpot – PULMÃO			
Distância (km)	Dose - Classe A	Dose - Classe D	Dose - Classe F
0,01	2,50E-04	7,70E-05	3,70E-04
0,02	2,20E-04	7,50E-05	3,60E-04
0,03	2,00E-04	7,30E-05	3,60E-04
0,04	1,70E-04	7,10E-05	3,50E-04
0,05	1,50E-04	6,90E-05	3,40E-04
0,1	7,70E-05	5,80E-05	3,10E-04
0,2	3,00E-05	4,00E-05	2,60E-04
0,3	1,60E-05	2,80E-05	2,30E-04
0,4	9,50E-06	2,10E-05	1,90E-04
0,5	6,40E-06	1,60E-05	1,70E-04
1	1,80E-06	6,80E-06	9,60E-05
2	4,80E-07	2,60E-06	4,50E-05
4	1,30E-07	9,70E-07	1,90E-05
6	6,30E-08	5,50E-07	1,10E-05
8	3,70E-08	3,80E-07	7,80E-06
10	2,50E-08	2,80E-07	5,90E-06

Tabela 12: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 2

Dados de saída HotSpot – PULMÃO			
Distância (km)	Dose - Classe A	Dose - Classe D	Dose - Classe F
0,01	4,30E-02	1,30E-02	6,60E-02
0,02	3,90E-02	1,30E-02	6,40E-02
0,03	3,50E-02	1,30E-02	6,30E-02
0,04	3,00E-02	1,30E-02	6,20E-02
0,05	2,60E-02	1,20E-02	6,00E-02
0,1	1,40E-02	1,00E-02	5,50E-02
0,2	5,40E-03	7,10E-03	4,70E-02
0,3	2,80E-03	5,10E-03	4,00E-02
0,4	1,70E-03	3,80E-03	3,50E-02
0,5	1,20E-03	3,00E-03	3,10E-02
1	3,30E-04	1,20E-03	1,80E-02
2	8,90E-05	4,80E-04	8,80E-03
4	2,50E-05	1,80E-04	3,80E-03
6	1,20E-05	1,10E-04	2,20E-03
8	7,00E-06	7,20E-05	1,60E-03
10	4,80E-06	5,40E-05	1,20E-03

Tabela 13: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 3

Dados de saída HotSpot – PULMÃO			
Distância (km)	Dose - Classe A	Dose - Classe D	Dose - Classe F
0,01	2,10E-01	6,70E-02	3,30E-01
0,02	2,00E-01	6,60E-02	3,20E-01
0,03	1,70E-01	6,40E-02	3,10E-01
0,04	1,50E-01	6,30E-02	3,10E-01
0,05	1,30E-01	6,10E-02	3,00E-01
0,1	6,90E-02	5,10E-02	2,80E-01
0,2	2,70E-02	3,50E-02	2,30E-01
0,3	1,40E-02	2,50E-02	2,00E-01
0,4	8,70E-03	1,90E-02	1,70E-01
0,5	5,80E-03	1,50E-02	1,50E-01
1	1,60E-03	6,20E-03	9,20E-02
2	4,50E-04	2,40E-03	4,40E-02
4	1,20E-04	9,10E-04	1,90E-02
6	5,90E-05	5,30E-04	1,10E-02
8	3,50E-05	3,60E-04	7,80E-03
10	2,40E-05	2,70E-04	5,90E-03

Tabela 14: Dose efetiva comprometida no Pulmão – Cenário 4

Dados de saída HotSpot – PULMÃO			
Distância (km)	Dose - Classe A	Dose - Classe D	Dose - Classe F
0,01	4,30E-01	1,30E-01	6,60E-01
0,02	3,90E-01	1,30E-01	6,40E-01
0,03	3,50E-01	1,30E-01	6,30E-01
0,04	3,00E-01	1,30E-01	6,20E-01
0,05	2,60E-01	1,20E-01	6,00E-01
0,1	1,40E-01	1,00E-01	5,50E-01
0,2	5,40E-02	7,10E-02	4,70E-01
0,3	2,80E-02	5,10E-02	4,00E-01
0,4	1,70E-02	3,80E-02	3,50E-01
0,5	1,20E-02	3,00E-02	3,10E-01
1	3,30E-03	1,20E-02	1,80E-01
2	8,90E-04	4,80E-03	8,80E-02
4	2,50E-04	1,80E-03	3,80E-02
6	1,20E-04	1,10E-03	2,20E-02
8	7,00E-05	7,20E-04	1,60E-02
10	4,80E-05	5,40E-04	1,20E-02

Com as doses equivalentes obtidas a partir dos dados de saída do HotSpot para cada cenário simulado, foi possível determinar o Risco Relativo (RR) para incidência de câncer de pulmão, utilizando um modelo ajustado para câncer no sistema respiratório disponibilizado pelo BEIR V. Apresentando os seguintes resultados:

CENÁRIO 1

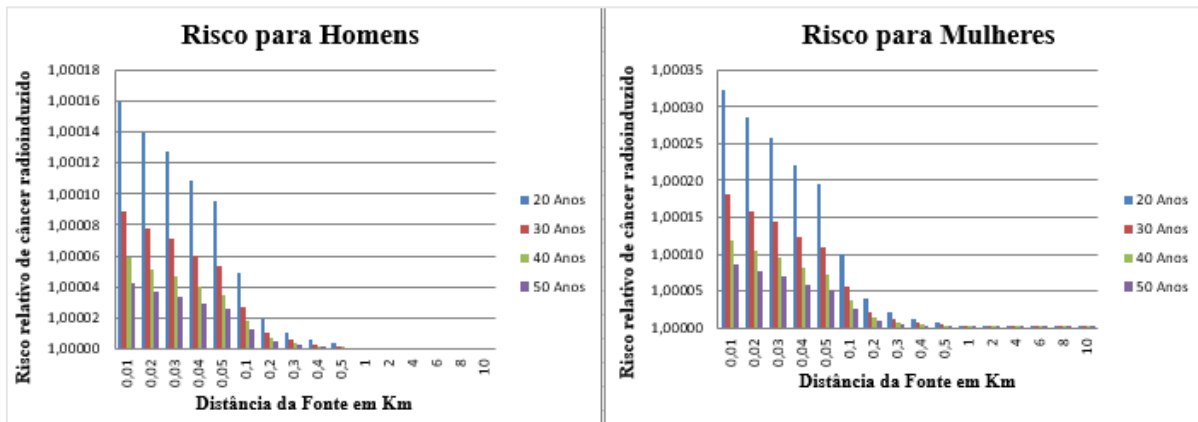


Figura 31: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A

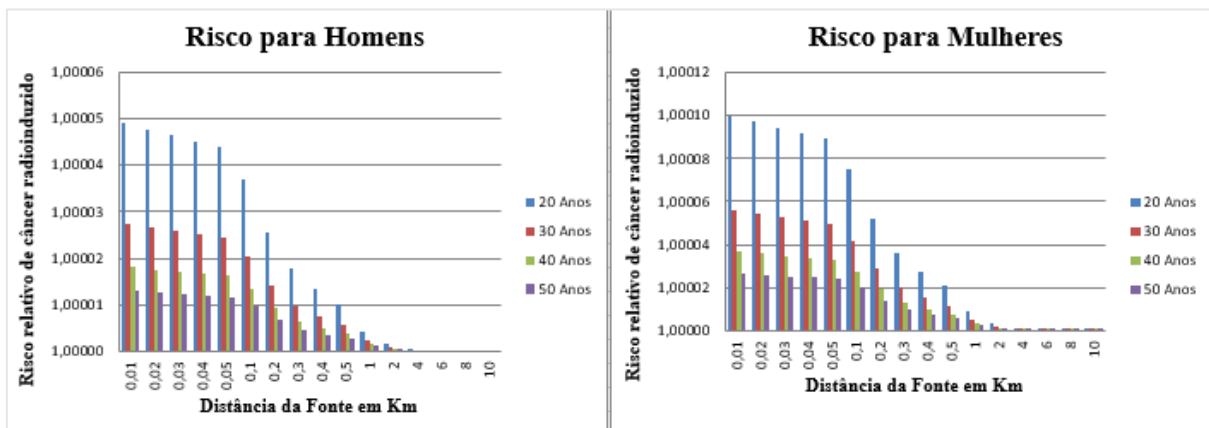


Figura 32: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D

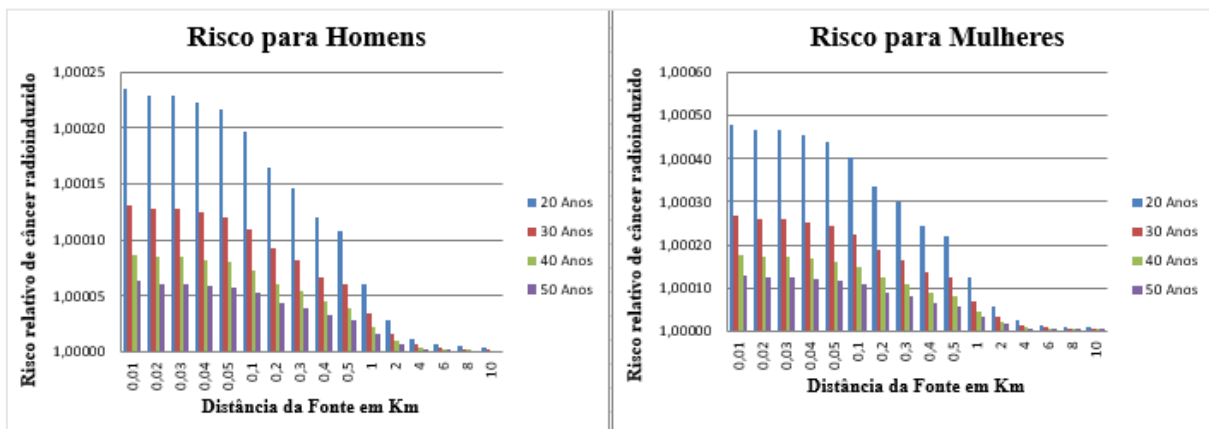


Figura 33: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F

CENÁRIO 2

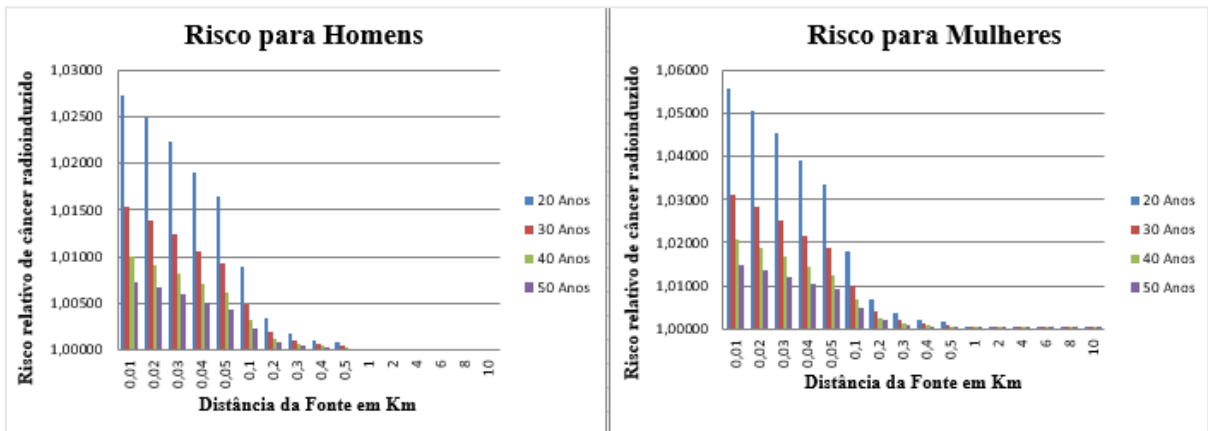


Figura 34: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A

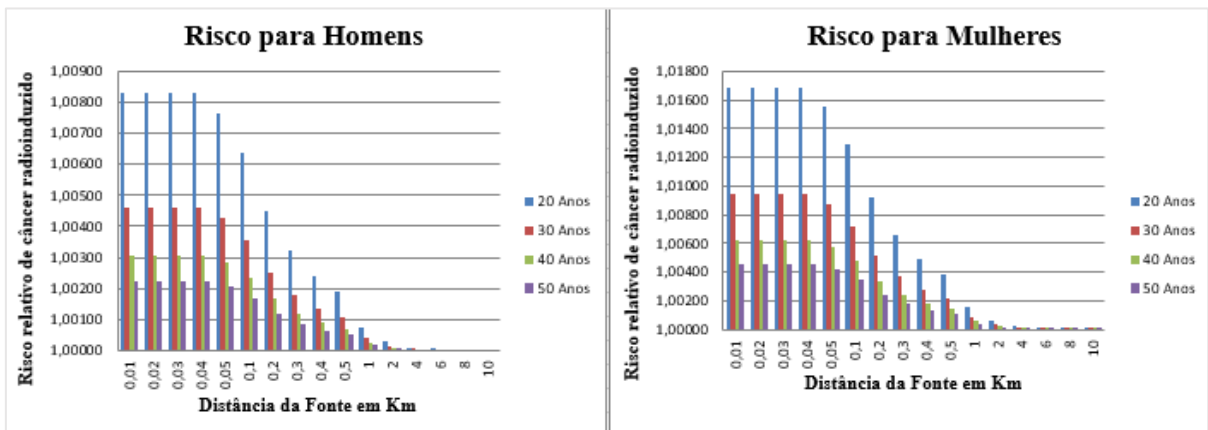


Figura 35: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D

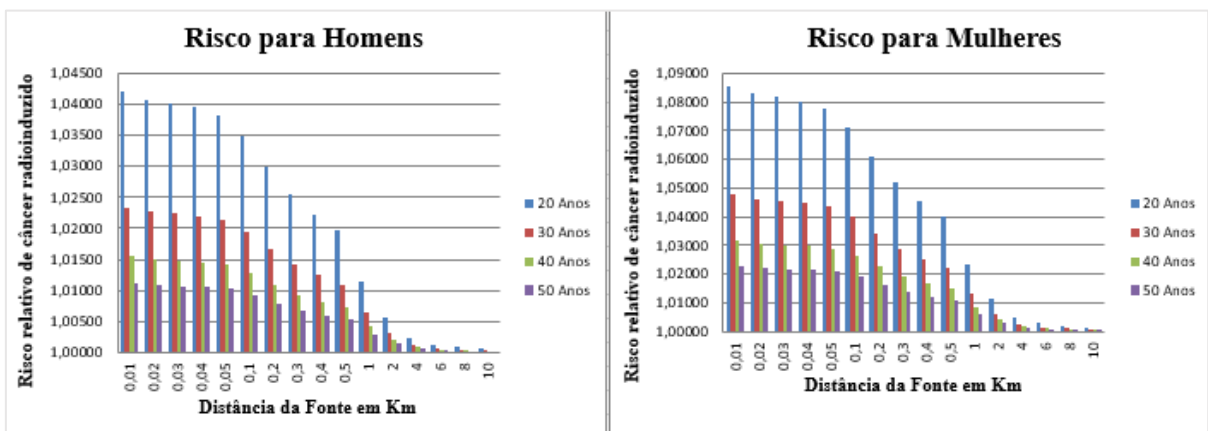


Figura 36: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F

CENÁRIO 3

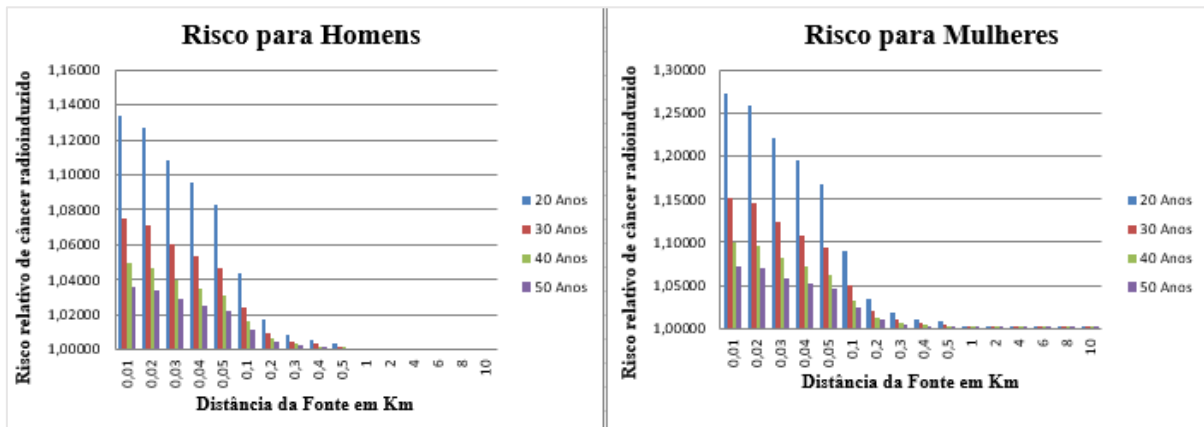


Figura 37: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A

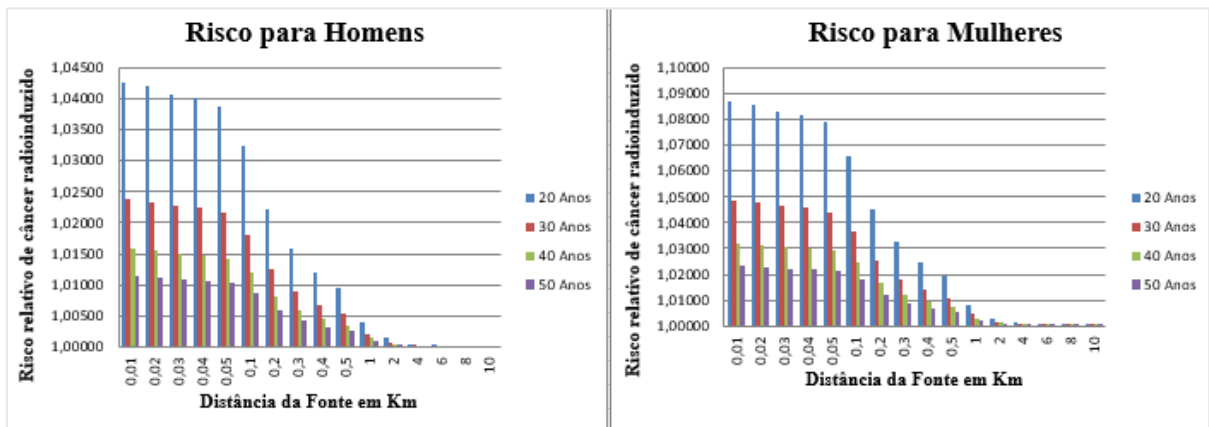


Figura 38: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D

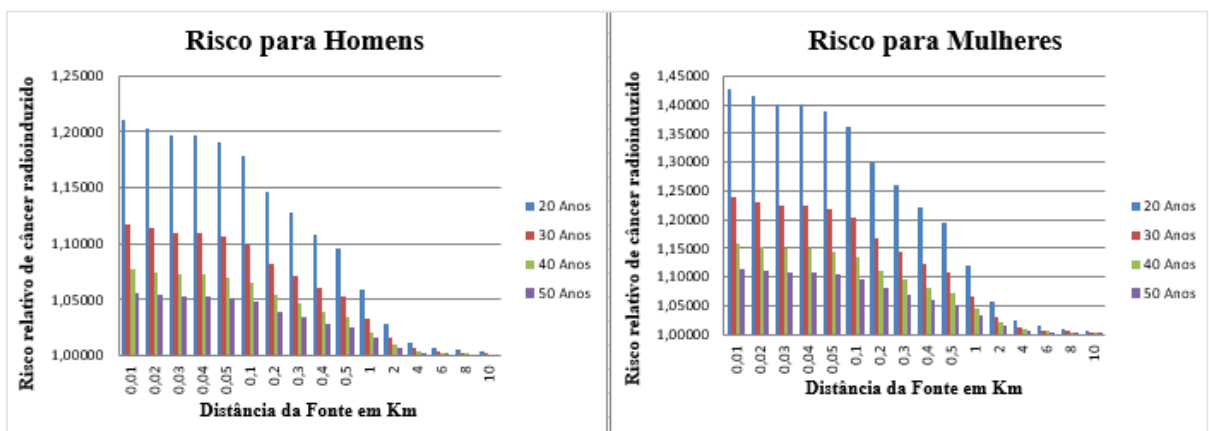


Figura 39: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F

CENÁRIO 4

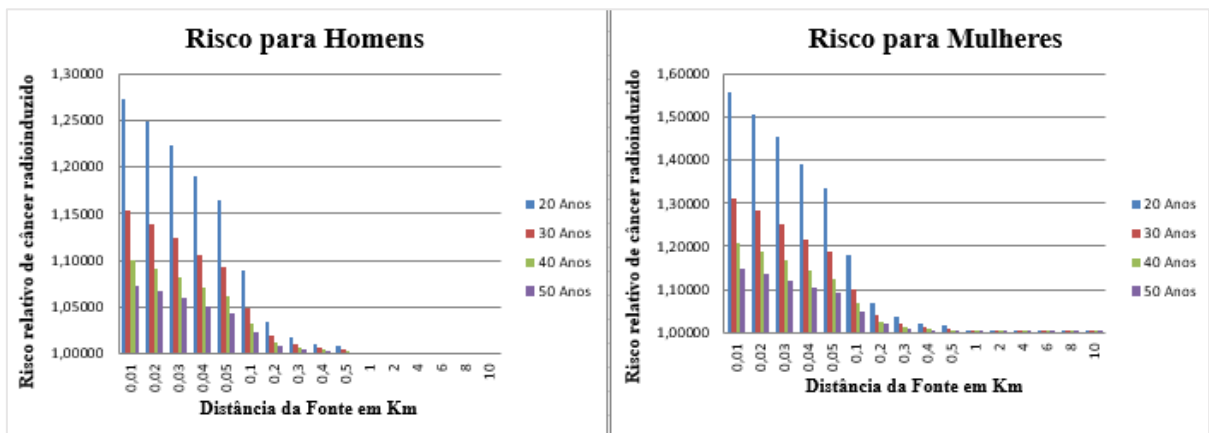


Figura 40: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE A

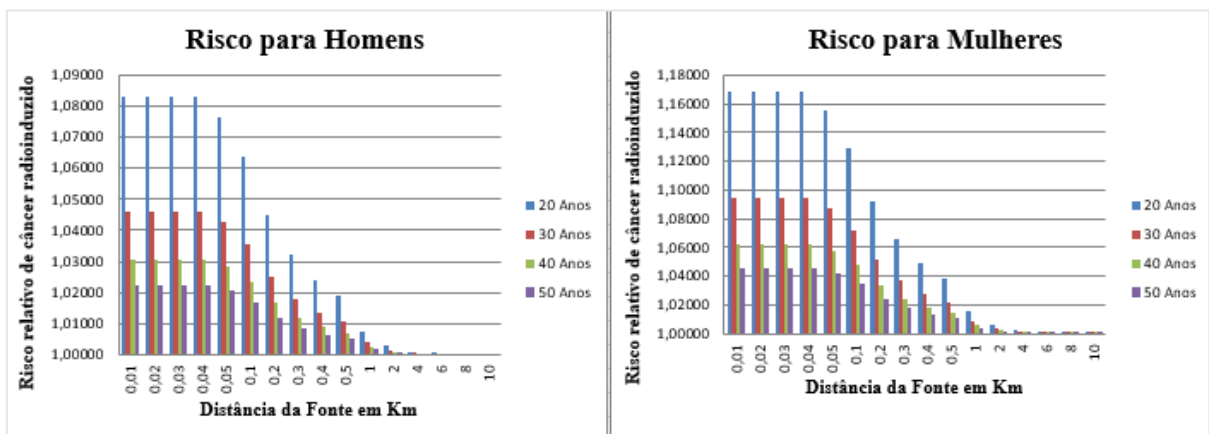


Figura 41: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE D

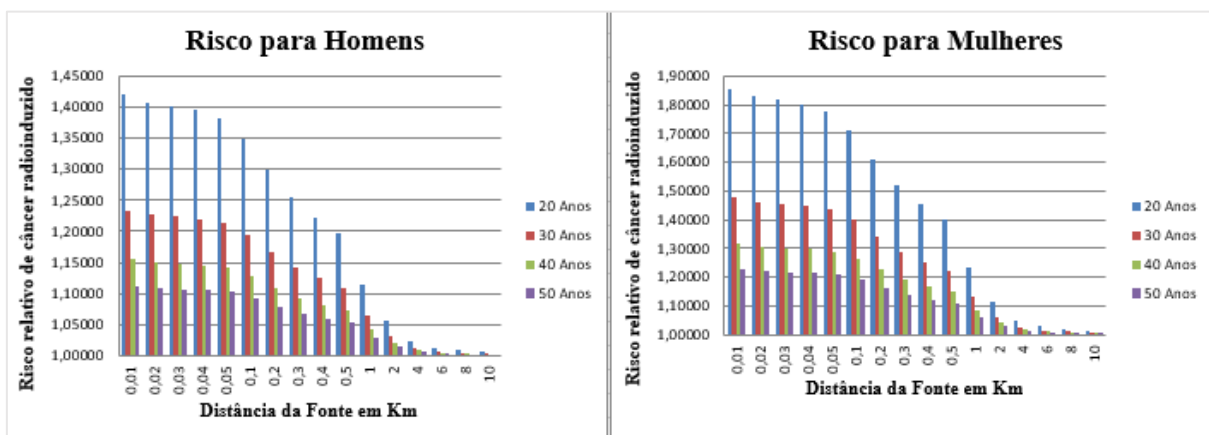


Figura 42: Risco relativo de câncer no pulmão. CLASSE F

Observa-se nos gráficos o risco relativo > 1 em todas as classes. De acordo Okuno (2009) para casos do risco relativo entre 1 e 2, há uma associação positiva a um dado agente, nesse caso indica que há uma associação positiva entre a dose e o risco relativo de câncer no pulmão, porém essa associação é considerada muito fraca. (Tabela 15)

Tabela 15: Interpretação do Risco Relativo. (Okuno, 2009)

Risco Relativo	Interpretação
> 3	Associação Forte
Entre 2 e 3	Associação Fraca
entre 1 e 2	Associação Muito Fraca
1	Não há associação
< 1	Associação Negativa (Efeito Protetor)

O risco relativo é observado mais elevado em poucos anos após a exposição e em mulheres, devido a sua grande quantidade de taxas basais serem mais baixas do que para os homens. É possível observar também uma diminuição do risco com o passar do tempo, ou seja, o risco se torna menor em pessoas com mais idade. O próprio BEIR V (1990) relata sobre a difícil tarefa de estimar o risco de desenvolvimento de câncer pulmonar induzido por radiação devido a fatores externos como o cigarro, poluição, a exposição à agentes químicos, entre outros fatores, que possam também influenciar no aparecimento do câncer.

5 CONCLUSÃO

Diante de um cenário de incêndio envolvendo material radioativo é fundamental informações que possam estimar o risco e minimizar os danos. A proposta desse trabalho era simular um incêndio em um depósito de rejeitos radioativos onde ocorre a liberação de material radioativo para atmosfera. A dispersão atmosférica desse material foi simulada variando a quantidade do inventário envolvido no incêndio e a fração respirável. O software HotSpot permite que seja criada uma mistura de radionuclídeos considerados no inventário e adicionar a fração desse inventário que será respirada, porém há uma certa dificuldade na criação dessa mistura, levando em consideração que o software não permite alterações de radionuclídeos já adicionados, qualquer alteração deve ser realizada criando novamente outra mistura.

O inventário do depósito usado nessa simulação, as condições de incêndio, a geometria padrão, as classes de estabilidade atmosférica, entre outros parâmetros adotados, visaram gerar estimativas mais conservadoras, fornecendo a dose associada à porcentagem do inventário envolvido para cada uma das classes de estabilidade atmosférica simuladas. Dentre os resultados obtidos pelas simulações, os valores para TED para o cenário 1 não ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma. Já os cenários 2, 3 e 4 houve um aumento da dose gerada, ficando acima do limite permitido para indivíduos do público.

A comparação dessas simulações permitiu analisar o comportamento da dispersão do material radioativo em função das condições de estabilidade atmosférica e da quantidade de material radioativo liberado. A classe de estabilidade atmosférica **A**, considerada como uma classe moderadamente instável obteve uma maior dispersão do material radioativo, na classe **D** e principalmente na classe **F** os valores de dose sofreram um aumento considerável, isso ocorre pela dificuldade na dispersão do material radioativo diante de condições atmosféricas mais estáveis, onde o vento em velocidade reduzida promove uma maior concentração do material radioativo em determinada área.

Simulações como essas além de servir como informações para uma aproximação de primeira ordem em casos emergenciais, podem auxiliar nos estudos de desenvolvimento de câncer induzido por radiações ionizantes. Como o HotSpot fornece a dose efetiva comprometida em vários órgãos, foi possível aplicar no modelo BEIR V, os valores da dose

efetiva comprometida no pulmão para cada cenário e classe de estabilidade para calcular o risco relativo de câncer no sistema respiratório. Os cenários simulados demonstraram um risco relativo entre 1 e 2, o que significa uma associação muito fraca entre a dose resultante dessa simulação e o risco de câncer no sistema respiratório.

Em trabalhos futuros há possibilidade de modelagem do cenário de incêndio usando CFD (Computacional Fluid Dynamics – Fluidodinâmica computacional) e aplicar as características comportamentais do incêndio para simulação da dispersão atmosférica em diferentes softwares de dispersão de material radioativo e realizar uma comparação dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 13860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR ISO 31000. Gestão de riscos – Princípios e Diretrizes. 1º Ed. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR ISO 9001. Sistemas de Gestão de Qualidade. 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2015.

AGUIAR, L. A. Avaliação de risco de um depósito próximo à superfície na fase pós-fechamento em cenário de liberação de radionuclídeos por infiltração de água. Rio de Janeiro, 2006.

ANDREUCCI, R. A Radiologia Industrial. Abendi, Ed. Jul. São Paulo, 2014.

ANDREUCCI, R. Proteção Radiológica: Aspectos Industriais Abendi, Ed. Jan. São Paulo, 2016.

ANVARI, A.; SAFARZADEH, L. Assessment of the total effective dose equivalent for accidental release from the Tehran Research Reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 50 (2012) pág. 251–255.

BEIR V. National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations), Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. Natl Acad.Press, Washington, DC (1990).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Norma CNEN-NN-1.04, Resolução: CNEN 15/02, Licenciamento de Instalações Nucleares. Rio de Janeiro, 2002.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Norma CNEN-NN-2.03, Resolução: CNEN 13/99, Proteção Contra Incêndio em Usinas Nucleoelétricas. Rio de Janeiro

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Norma CNEN-NN-2.04, Resolução: CNEN 03/97, Proteção Contra Incêndio em instalações do ciclo do combustível.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Norma CNEN-NN-3.01. Resolução: CNEN 164/14, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Rio de Janeiro: CNEN, 2014a

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Posição Regulatória 3.01/002:2011, Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica. Rio de Janeiro, 2011.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Norma CNEN-NN-8.01, Resolução: CNEN 167/14. Gerência de rejeitos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro: CNEN, 2014b.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. Norma CNEN-NN-8.02, Resolução: CNEN 168/14. Licenciamento De Depósitos De Rejeitos Radioativos De Baixo E Médio Níveis De Radiação. Rio de Janeiro: CNEN, 2014c.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL, CBM-DF, Manual de segurança contra incêndio e pânico-Proteção passiva. Brasília- DF, 2007. Pág. 216.

DOMINGOS, E. N.; AGUIAR, L. A.; LIMA, Z. R. Simulation of Fire in a Deposit of Radioactive Waste and the Radiological Risk Associated to this Scenario. International Nuclear Atlantic Conference – INAC, Belo Horizonte – MG, 2017.

HANNA, S., R. Briggs, and R. Hosker, Jr. (1982), Handbook on Atmospheric Diffusion, prepared for the Office of Health and Environmental Research, DOE/TIC-11223 (DE82002045), pp. 6871 (Office of Energy Research, U.S. Department of Energy).

HOMANN, S. G. HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA. 2013.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Categorization of Radioactive Sources. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, Safety Guide No. RS-G-1.9. Vienna, 2005.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA, Fire Protection in Nuclear Power Plants. Safety Series No. 50-SG-D2 (Ver.1). Vienna, 1992.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Gerência de Rejeitos Radioativos
cap. 08 disponível em:

<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073473.pdf>
Acesso em: 07/12/2017

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Low and intermediate level waste repositories: Socioeconomic aspects and public involvement. Proceedings... TECDOC-1553. Vienna, 2007a.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Methods for estimating the probability of cancer from occupational radiation exposure. TECDOC-870. Vienna, 1996.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Near surface disposal of radioactive waste. Safety Standards Series No. WS-R-1. Vienna, 1999a.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Waste inventory record keeping systems (WIRKS) for management and disposal of radioactive waste. TECDOC-1222. Vienna, 2001b.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP. ICRP - Publication 60, Ann. ICRP 21, (1-3), 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP. ICRP - Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.

JEONG et al. Radiological Safety Assessment of Transporting Radioactive Wastes to the Gyeongju Disposal Facility in Korea. Nuclear Engineering and Technology 48, 2016. 1368 e1375.

KTNV. Channel 13 Las Vegas, disponível em:
<<https://www.youtube.com/watch?v=8VHylGDOvwU&t=41s>> Acesso em: 29/04/2017.

MUSWEMA, J. L. et al., Atmospheric dispersion modeling and radiological safety analysis for a hypothetical accident of Ghana Research Reactor-1 (GHARR-1) Ann. of Nuclear Energy 68, 2014. 239–246.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, NRC. The Browns Ferry Nuclear Plant Fire of 1975 Knowledge Management Digest. NUREG/KM-0002, Office of Nuclear Regulatory Research, 2013.

OKUNO, E. Epidemiologia do câncer devido a radiações e a elaboração de recomendações. Revista Brasileira de Física Médica. 2009;3(1):43-55.

PIROUZMAND, A. et al. Dose assessment of radionuclides dispersion from Bushehr nuclear power plant stack under normal operation and accident conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* 40, 2015. 15198-15205.

PUTNAM, F.W. The Atomic Bomb Casualty Commission in retrospect. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/95/10/5426#sec-7>> Acesso em: 02/02/2018.

RERF - RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION. Disponível em: <https://www.rerf.or.jp/general/research_e/radtoc.html> Acesso em: 02/02/2018.

ROTHER, F. C. et al.; Radiological risk assessment by convergence methodology model in rdd scenarios. *Risk analysis* [0272-4332] 2016 Vol:36 Fasc: 11 p.: 2039-2046.

SANTOS, G. C. Manual de Radiologia: Fundamentos e Técnicas. Edição 01,2010, São Caetano do Sul, SP.

SEITO, A. I. et al. A Segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496 p. 21 cm. ISBN: 978-85-61295-00-4.

SHAMSUDDIN, S. D. et al., Radioactive dispersion analysis for hypothetical nuclear power plant (NPP) candidate site in Perak state, Malaysia. *EPJ Web of Conferences* 156, 00009 2017.

SAVANA RIVER NATIONAL LABORATORY, SRNL. Waste Isolation Pilot Plant Technical Assessment Team Report. SRNL-RP-2014-01198. 17 de Março de 2015

GOMES, T. Projeto de prevenção e combate à incêndios. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Rio Grande do Sul, 2014.

TAUHATA et al., Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. CNEN. Rio de Janeiro, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, UFRGS. Princípios Básicos de Proteção e Segurança Radiológica. 3ª Ed. Rio Grande do Sul, setembro 2006.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, USNRC. The Browns Ferry Nuclear Plant Fire of 1975 Knowledge Management Digest. NUREG/KM-0002, Rev.1. 2014. Office of Nuclear Regulatory Research. EUA, 2014.

VAE – Visagino atominé elektriné. Disponível em: <<http://www.vae.lt/>> Acesso em: 09.12.2017.

WAGNER, M. B. et al. Medidas de associação em estudos epidemiológicos: risco relativo e odds ratio. *Jornal Pediatria*, 1998; 74:247-251.