

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

ANDERSON WAGNER DIAS DE SOUZA

ESTIMATIVA DO IMPACTO RADIOLÓGICO DE UM HIPOTÉTICO ACIDENTE EM
UM PWR CONSIDERANDO AS CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA E A
VELOCIDADE DO VENTO

Rio de Janeiro

2021

ANDERSON WAGNER DIAS DE SOUZA

ESTIMATIVA DO IMPACTO RADIOLÓGICO DE UM HIPOTÉTICO ACIDENTE EM
UM PWR CONSIDERANDO AS CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA E A
VELOCIDADE DO VENTO

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 Mestre em Ciência e Tecnologia Nucleares.

Orientador: Zelmo Rodrigues de Lima, D.Sc

Rio de Janeiro

2021

WAGN Wagner Dias de Souza, Anderson

Estimativa do Impacto Radiológico de um Hipotético Acidente em um PWR Considerando as Classes de Estabilidade Atmosférica e Velocidade do Vento / Anderson Wagner Dias de Souza. -- Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2021.

xv, 99f. : il. ; 29,7 cm.

Orientador: Zelmo Rodrigues de Lima

Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2021.

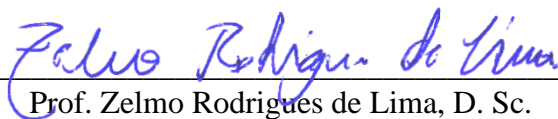
1. Reator a Água Pressurizada 2. Acidentes de Perda de Refrigerante 3. Dispersão Atmosférica 4. Dose Efetiva Total 5. Dose Equivalente Comprometida

ESTIMATIVA DO IMPACTO RADIOLÓGICO DE UM HIPOTÉTICO ACIDENTE EM
UM PWR CONSIDERANDO AS CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA E A
VELOCIDADE DO VENTO

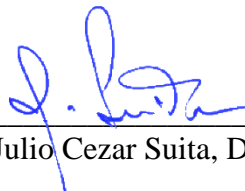
Anderson Wagner Dias de Souza

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 MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES

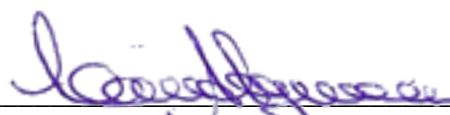
Aprovada por:



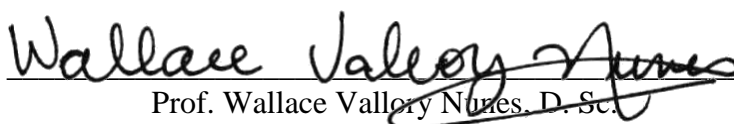
Prof. Zelmo Rodrigues de Lima, D. Sc.



Prof. Julio Cezar Suita, D. Sc.



Prof^a. Laís Alencar de Aguiar, D. Sc.



Prof. Wallace Vallory Nunes, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família, pelo apoio que me permitiu chegar até aqui.

Agradeço ao orientador Zelmo Rodrigues de Lima pelo suporte acadêmico e ao professor Edson Ramos de Andrade que me fez ingressar na área nuclear.

Aos meus colegas de classe da Turma 2017 do Programa de Pós-graduação.

Agradeço a todos os funcionários do Instituto de Engenharia Nuclear e ao Programa de Pós-graduação e em especial a Servidora Cláudia Maria Dias Coelho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Julio Cezar Suita, Prof^a. Laís Alencar de Aguiar e Prof. Wallace Vallory Nunes, por se disponibilizarem a participar.

Agradeço a Comissão Nacional de Energia Nuclear e ao IEN por oferecerem o curso de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares.

Finalmente, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior por me conceder a bolsa de estudos.

RESUMO

A geração de energia elétrica a partir de usinas nucleares está bem estabelecida pela tecnologia nuclear a qual vem sendo desenvolvida por várias décadas. Acompanhando essa evolução, a cultura da segurança nuclear também alcançou um nível elevado de desenvolvimento. Desde a etapa do projeto, passando pela construção e operação normal das usinas núcleo-elétricas ou em caso de acidentes, a análise de segurança está presente. A probabilidade de correr um acidente em um reator nuclear de potência ou em seus sistemas de refrigeração instalados nessas usinas é muito pequena, ou mesmo insignificante em termos estatísticos. Apesar disso, a análise de segurança implementa estudos que consideram a ocorrência hipotética de acidentes, simulando como consequência, a liberação de material radioativo na atmosfera. Modelos de dispersão atmosférica para estimar o comportamento da pluma radioativa são implementados, incluindo importantes estimativas do impacto radiológico no público. Nesta dissertação foi analisada a influência da estabilidade atmosférica e da velocidade do vento no transporte de uma pluma radioativa gerada por um hipotético acidente de perda de refrigerante em um genérico PWR e foi estudado o impacto radiológico no público exposto à pluma. Para este fim, foi utilizado o software HotSpot Health Physics Code para simular diversos cenários e gerar a dose efetiva total e a dose equivalente comprometida recebidas pelo público em função das classes de estabilidade atmosférica e da velocidade do vento.

Palavras-chave: Reator a Água Pressurizada, Acidentes de Perda de Refrigerante, Dispersão Atmosférica, Dose Efetiva Total, Dose Equivalente Comprometida.

ABSTRACT

The generation of electrical energy from nuclear power plants is well established by nuclear technology, which has been developed for several decades. Following this evolution, the culture of nuclear safety has also reached a high level of development. From the design stage, through the construction and normal operation of the nuclear power plants or in case of accidents, safety analysis is present. The probability of having an accident in a nuclear power reactor or in its cooling systems installed in these plants is very small, or even statistically insignificant. Despite this, the safety analysis implements studies that consider the hypothetical occurrence of accidents, simulating therefore, the release of radioactive material into the atmosphere. Atmospheric dispersion models to estimate the behavior of the radioactive plume are implemented, including important estimates of the radiological impact on the public. In this dissertation, the influence of atmospheric stability and wind speed on the transport of a radioactive plume generated by a hypothetical loss-of-coolant accident in a generic PWR was analyzed and the radiological impact on the public exposed to the plume was studied. For this purpose, the software HotSpot health Physics Code was used to simulate different scenarios and to generate the total effective dose and the compromised equivalent dose received by the public according to the classes of atmospheric stability and wind speed.

Keywords: Pressurized Water Reactor, Loss-of-Coolant Accident, Atmospheric Dispersion, Total Effective Dose, Committed Equivalent Dose.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Circuito Primário do PWR: (1) Vaso do Reator, (2) Gerador de Vapor, (3) Bomba do Refrigerante, (4) Pressurizador, (5) Perna Fria, (6) Perna Quente, (7) Acumulador, (8) Válvula de Segurança, (9) Tanque de Mitigação, (10) Sistema de Injeção. (TABADAR, et al, 2018).	32
Figura 2: Sistema de coordenadas do modelo de dispersão atmosférica gaussiano. Adaptado de HOMANN, (2014).	33
Figura 3: Tela inicial do HotSpot com as opções de modelos de dispersão atmosféricas pré-configuradas.	46
Figura 4: Tela do HotSpot para configurar os dados do termo de fonte.	47
Figura 5: Tela do HotSpot para configurar os dados da velocidade do vento em 10 metros e as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford.	47
Figura 6: Tela do HotSpot para configurar a altura do receptor e as vinte posições em relação ao ponto de liberação da pluma.	48
Figura 7: Tela do HotSpot para configurar vários parâmetros.	48
Figura 8: Tela do HotSpot para configurar os arquivos do65de tabelas e gráficos que são gerados na saída.	49
Figura 9 Variação da Dose Efetiva Total com a distância a partir do ponto de liberação, para cada velocidade.	51
Figura 10: Variação da Dose Efetiva Total Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	53
Figura 11: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade A. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.	57
Figura 12: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade B. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.	58
Figura 13: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade C. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.	59
Figura 14: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade D. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.	60
Figura 15: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade E. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.	61
Figura 16: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade F. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.	62
Figura 17: Classe de estabilidade A, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.	70

Figura 18: Classe de estabilidade B, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.	71
Figura 19: Classe de estabilidade C, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.	72
Figura 20: Classe de estabilidade D, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.	73
Figura 21: Classe de estabilidade E, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.	74
Figura 22: Classe de estabilidade F, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.	75
Figura 23: Tireoide - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	77
Figura 24: Pulmão - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	78
Figura 25: Esôfago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	79
Figura 26: Parede do Intestino Grosso Inferior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	80
Figura 27: Superfície dos Ossos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	81
Figura 28: Parede do Intestino Grosso Superior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	82
Figura 29: Medula Óssea Vermelha - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	83
Figura 30: Fígado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	84
Figura 31: Parede da Bexiga - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	85
Figura 32: Parede do Intestino Delgado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	86
Figura 33: Parede do Estômago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	87
Figura 34: Ovários - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	88
Figura 35: Pele - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	89
Figura 36: Timo - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	90
Figura 37: Glândulas Adrenais - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	91
Figura 38: Pâncreas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	92
Figura 39: Baço - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	93
Figura 40: Útero - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	94
Figura 41: Rins - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	95
Figura 42: Mamas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	96
Figura 43: Músculos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	97

Figura 44: Cérebro - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	98
Figura 45: Testículos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: As classes de estabilidade de Pasquill.....	38
Tabela 2: Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno padrão (HOMANN, 2014).	39
Tabela 3: Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno urbano (HOMANN, 2014).	40
Tabela 4: Inventário do termo de fonte liberado pelo LOCA.	44
Tabela 5: Variação da Dose Efetiva Total Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.....	52
Tabela 6: Variação da Área da Isodose com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	55
Tabela 7: Tireoide - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	77
Tabela 8: Pulmão - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	78
Tabela 9: Esôfago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	79
Tabela 10: Parede do Intestino Grosso Inferior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	80
Tabela 11: Superfície dos Ossos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	81
Tabela 12: Parede do Intestino Grosso Superior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	82
Tabela 13: Medula Óssea Vermelha - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	83
Tabela 14: Fígado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	84
Tabela 15: Parede da Bexiga - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	85
Tabela 16: Parede do Intestino Delgado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.....	86
Tabela 17: Parede do Estômago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	87
Tabela 18: Ovários - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	88
Tabela 19: Pele - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	89
Tabela 20: Timo - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	90
Tabela 21: Glândulas Adrenais - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	91
Tabela 22: Pâncreas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	92
Tabela 23: Baço - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	93
Tabela 24: Útero - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	94

Tabela 25: Rins - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	95
Tabela 26: Mamas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	96
Tabela 27: Músculos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	97
Tabela 28: Cérebro - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	98
Tabela 29: Testículos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARA	- As Low As Reasonably Achievable
BEIR V	- Biological Effects of Ionizing Radiation V
CED	- Committed Equivalent Dose
CNEN	- Comissão Nacional de Energia Nuclear
DBA	- Design Basis Accident
EAEA	- Egyptian Atomic Energy Authority
EPA	- Environmental Protection Agency
FGR	- Federal Guidance Report
IAEA	- International Atomic Energy Agency
ICRP	- International Commission on Radiological Protection
IND	- Improvised Nuclear Device
LBLOCA	- Large Break Loss of Coolant Accident
LOCA	- Loss-of-Coolant Accident
MOV	- Medula Óssea Vermelha
PID	- Parede do Intestino Delgado
PIGI	- Parede do Intestino Grosso Inferior
PIGS	- Parede do Intestino Grosso Superior
PWR	- Pressurized Water Reactor
RDD	- Radiological Dispersal Device
RERF	- Radiation Effects Research Foundation
SGTR	- Steam Generator Tube Rupture
TED	- Total Effective Dose
TEPCO	- Tokyo Electric Power Company
TMSR-LF	- Thorium Molten Salt Reactor - Liquid Fuel
VVER	- Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	18
1.1.1. Objetivo Geral	18
1.1.2. Objetivos Específicos	18
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1. RADIAÇÃO NUCLEAR	23
3.1.1. Tipos de Radiações	23
2.1.1.1. Partículas Alfa	24
2.1.1.2. Partículas Beta	24
2.1.1.3. Radiação Gama	25
2.1.1.4. Nêutrons	25
2.1.1.5. Fragmentos de Fissão	26
2.1.2. Cálculo do Decaimento	26
2.1.3. Efeitos biológicos das radiações ionizantes	27
2.2. GRANDEZAS RADIOLÓGICAS	28
2.2.1. Dose Absorvida	28
2.2.2. Dose Equivalente	29
2.2.3. Dose Equivalente Comprometida	29
2.2.4. Dose Efetiva	30
2.2.5. Dose Efetiva Comprometida	30
2.2.6. Dose Efetiva Total	31
2.3. ACIDENTES DE BASE DE PROJETO	31
2.4. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	32
4. SOFTWARE HOTSPOT	35
4.1. EQUAÇÃO GAUSSIANA	35
4.2. CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA	36
4.3. DOSE NA PASSAGEM DA PLUMA	40
4.4. FATORES DE CONVERSÃO DE DOSE	40
5. METODOLOGIA	42
5.1. CENÁRIO DO LOCA E DEFINIÇÃO DO TERMO DE FONTE	42
5.2. CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO E ENTRADA DOS DADOS NO HOTSPOT	45
6. RESULTADOS	50
6.1. DOSE EFETIVA TOTAL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA	50

6.2.	CURVAS DE ISODOSES	53
6.3.	DOSES EQUIVALENTES COMPROMETIDAS	56
7.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
7.1.	CONCLUSÃO	63
7.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A: CURVAS DE ISODOSES	69
	APÊNDICE B: VARIAÇÃO DA DOSE EQUIVALENTE COMPROMETIDA MÁXIMA DOS 23 ÓRGÃOS E TECIDOS	76

1. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia nuclear durante várias décadas permitiu uma relevante participação da área nuclear na geração de energia elétrica no cenário mundial. Reatores nucleares de potência instalados em usinas núcleo-elétricas são responsáveis por essa tarefa. Até o final do ano de 2019, foram registrados 443 reatores nucleares de potência em operação e 54 em construção no mundo, distribuídos em 34 países. Desses reatores, 300 em operação e 44 em construção, são reatores do tipo PWR, reatores a água pressurizada (IAEA, 2020). As usinas brasileiras de Angra I e II são equipadas com reatores do tipo PWR e, igualmente, a futura Angra III. Os PWRs foram desenvolvidos pela primeira vez nos Estados Unidos com base na experiência do programa de reatores navais. A primeira unidade comercial de produção de energia elétrica começou a operar em Shippingport, Pensilvânia, em 1957. A estrutura básica do núcleo PWR é o elemento combustível de aproximadamente $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 4\text{ m}$ de altura, consistindo em uma matriz de pinos de combustível de UO_2 revestidos de zircaloy, ou varetas, de cerca de 1 cm de diâmetro. O enriquecimento do urânio varia de cerca de 2 a 4%. Um elemento combustível típico pode consistir em uma matriz de 17×17 varetas de combustível. O refrigerante, no caso a água, flui em uma estrutura de rede aberta que permite alguma mistura de fluxo e está sob pressão suficiente para que nenhuma ebulição ocorra em operação normal (STACEY, 2007).

Uma das principais preocupações da tecnologia nuclear diz respeito à segurança nuclear relativa a qualquer instalação radioativa ou nuclear, entre elas as usinas de geração núcleo-elétrica. Os objetivos da segurança nuclear consistem em assegurar que a localização e as condições da usina atendam a princípios adequados, como, por exemplo, os princípios de saúde, segurança e radioproteção internacionalmente aceitos. Em particular, a planta no local escolhido deve garantir que a saúde da população e dos trabalhadores não sofra consequências adversas da radiação mais graves do que os limites estabelecidos e que tais efeitos sejam os mais baixos razoavelmente obtidos (princípio de ALARA - As Low As Reasonably Achievable, tão baixo quanto razoavelmente exequível) em todas as condições operacionais e em caso de acidentes (PETRANGELI, 2006). A segurança nuclear conduz à análise de segurança nuclear que tem como objetivo auxiliar a definir e confirmar, por meio de ferramentas de análise adequadas, a base de segurança para as partes da planta nuclear que são importantes para a segurança e garantir que o projeto geral da planta seja capaz de cumprir os limites de dose em

vigor e com as liberações radioativas especificadas para quaisquer condições da planta. Uma ferramenta muito importante empregada na análise de segurança são os chamados acidentes de base de projeto (design basis accidents, DBA). O DBA é um acidente postulado que leva a condições de acidente para o qual uma instalação nuclear é projetada e construída de acordo com os critérios de projeto estabelecidos e com metodologia conservadora, e para resistir sem perdas aos sistemas, estruturas e componentes necessários garantindo a saúde e segurança do público (IAEA, 2019, NRC, 2021). Os DBAs são os cenários considerados como base para o licenciamento da instalação nuclear. Também são chamados de “acidentes de referência” (REVENTOS, 2017). Como exemplo, os seguintes eventos estão incluídos dentro dos DBAs: uma quebra instantânea, tipo guilhotina, da maior tubulação do circuito primário, que corresponde aos acidentes de perda de refrigerante (Loss-Of-Coolant Accidents, LOCAs); a súbita expulsão de uma barra de controle do núcleo; e a evento sísmico de máximo potencial no local da planta nuclear (PETRANGELI, 2006).

Um DBA pode considerar a liberação de material radioativo para o meio externo à instalação nuclear, podendo ocorrer a emissão de uma pluma radioativa na atmosfera. Para estimar o comportamento da pluma radioativa em função dos diversos fatores atmosféricos, bem como do seu impacto radiológico no meio ambiente e nos indivíduos, é necessário recorrer a modelos matemáticos que simulam a dispersão atmosférica do material radioativo transportado pela pluma. Um dos modelos mais tradicionalmente adotado é o modelo de dispersão gaussiano. O modelo gaussiano geralmente produz resultados que concordam bem com os dados experimentais em condições meteorológicas e de terreno simples. As estimativas geradas por esse modelo levam em consideração a estabilidade atmosférica e a distância a partir do ponto em que a pluma é liberada. A estabilidade atmosférica está diretamente relacionada pelos fenômenos turbulentos e os estudos sobre esse comportamento foram bem estabelecidos no início da década de 60 por Pasquill e Gifford (PASQUILL, 1961, GIFFORD, 1961). As características da estabilidade atmosférica foram categorizadas em seis classes de estabilidade indo de A até F, sendo, por exemplo, a classe A extremamente instável e a classe F moderadamente estável.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar a influência das classes de estabilidade atmosféricas e da velocidade do vento nas doses recebidos por indivíduos atingidos por uma pluma radioativa que foi gerada por DBA de perda de refrigerante em um reator do tipo PWR.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Estimar as doses efetivas sobre indivíduos devido a passagem da pluma gerada por um LOCA em um PWR empregando o software HotSpot. As estimativas devem considerar as seis classes de estabilidade atmosféricas de Pasquill e Gifford e a variação da velocidade do vento.
- b) Estimar as doses equivalentes comprometidas em diversos órgãos e tecidos de indivíduos no mesmo cenário do item anterior.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto da dissertação está organizado na seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica; no capítulo 3 é apresentada a fundamentação; no capítulo 4 é apresentado o software HotSpot, ferramenta computacional empregada neste trabalho; no capítulo 5 é apresentada a metodologia, descrevendo como os cenários e o HostSpot foram configurados; no capítulo 6 são apresentados os resultados que foram gerados nas simulações; e, finalmente, no capítulo 7 é apresentada a conclusão e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos que foram desenvolvidos nos últimos anos relativos à pesquisa sobre a dispersão atmosférica da pluma radiativa e da estabilidade atmosférica. O acervo apresentado serviu de embasamento para o desenvolvimento desta dissertação e cada trabalho consultado é apresentado de forma resumida.

Costa (2018) em sua dissertação de mestrado considerou a simulação de um dispositivo de dispersão radiológica (RDD) envolvendo Amerício-241, acoplando os resultados do software HotSpot às equações epidemiológicas do BEIR V, gerando uma avaliação de risco de incidência de câncer de pulmão. Foi calculado o impacto no custo de detrimento e sugerido medidas de proteção os quais servirão de apoio ao processo decisório de gerenciamento do quadro de emergência a fim de otimizar proteção, custo e tempo. Na simulação usando o HotSpot foi considerado um valor para a velocidade do vento, 1,0 m/s, e a uma classe de estabilidade de Pasquill-Gifford, G.

Domingos (2018) em sua dissertação de mestrado 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, contendo 16 radionuclídeos. Para essa simulação também foi adotado o HotSpot, que além de estimar a dose efetiva total em relação à distância, estima a dose comprometida em uma lista de órgãos específicos, entre eles o pulmão, objeto de estudo do trabalho para o cálculo do risco de câncer associado a uma baixa dose de radiação. O cálculo do risco radiológico foi realizado empregando também o modelo BEIR V. Nas simulações usando o HotSpot foram consideradas três classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford: A, D e F, com as respectivas velocidades do vento: 2,0 m/s, 6,0 m/s e 1,0 m/s.

Em Funcke (2019) foi realizado um estudo da blindagem oferecida por diversos tipos de estruturas urbanas (como prédios de concreto, casas de madeira ou tijolo, veículos etc.) não afetadas por nenhum outro efeito que não fosse a radiação proveniente do IND (Dispositivo Nuclear Improvisado). Desta forma, considerando distâncias similares ao epicentro de detonação entre as diversas blindagens estudadas, elencou-se as estruturas urbanas em ordem decrescente de proteção, a fim de servir de apoio ao gerenciamento da prioridade nos

procedimentos de evacuação, abrigagem e triagem em um quadro de emergência. A explosão nuclear proveniente da detonação de um IND de 10 quilotons é semelhante a uma bomba nuclear de cerca de três quartos do tamanho da bomba de Hiroshima. A simulação utilizou o software HotSpot implementando o modelo de explosão nuclear incluído no Programa de Proposta Especial do HotSpot, com o valor padrão da velocidade do vento de 6,8 m/s. Esse modelo não leva em conta as classes de estabilidade atmosférica.

Em Bulhosa (2018) na sua dissertação de mestrado estudou-se a influência das classes de estabilidade atmosféricas de Pasquill-Gilfford sobre as consequências de um evento RDD, com o termo de fonte constituído pelo Cs-137, simulado com relação ao risco de desenvolvimento de câncer sólido na população exposta. O software HotSpot também foi utilizado para a simulação do cenário radiológico que permitiu estimar as doses recebidas pelos indivíduos expostos e a contaminação ambiental no local do evento. A dose estimada foi utilizada como dados de entrada para o modelo bioestatístico desenvolvido pela RERF para estimar o risco de desenvolvimento de morbidade relacionável ao evento. Os dados do HotSpot permitiram efetuar o cálculo das áreas afetadas, doses em cada área, bem como estimativa de risco relativo de câncer sólido para a população afetada, levando em consideração idade e sexo e sua possível relação com as classes de estabilidade atmosférica. As simulações usaram como dados de entrada a velocidade do vento igual a 5,0 m/s e as seis classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gilfford.

No estudo de Cao (2018) o software HotSpot foi usado para a modelagem de dispersão atmosférica e avaliação de segurança radiológica considerando condições meteorológicas específicas de um sítio com um TMSR-LF (Reator de Sal Fundido de Tório - Combustível Líquido) instalado. Foram realizados cálculos de dose equivalente efetiva total. O valor máximo da dose ficou abaixo do limite de dose pública de 1mSv / ano proposto pelo ICRP, mesmo para o pior cenário de acidente. Observou-se que o maior valor de dose efetiva comprometida equivalente parece ser o pulmão, a parede do intestino grosso inferior parece ser o segundo órgão mais exposto, seguida da parede do intestino grosso superior e da medula vermelha, respectivamente. A contribuição de um total de 18 radionuclídeos selecionados foi investigada, três radionuclídeos, Sr-90, Sr-89 e Cs-137 são os principais contribuintes para a dose efetiva comprometida equivalente. As simulações consideraram a velocidade do vento igual a 5,0 m/s e a classe de estabilidade atmosférica D de Pasquill-Gilfford.

No artigo de Yuniarto (2019) a dispersão de materiais radioativos durante o acidente de base de projeto (DBA) de um reator de pesquisa na Indonésia é modelada usando o software HotSpot, utilizando dados meteorológicos específicos do local. Com base na modelagem, a dose efetiva máxima e a dose equivalente da tireoide de 1,030 mSv e 26 mSv para os primeiros 7 dias de exposição foram alcançadas a uma distância de 1 km do ponto de liberação. Esses valores encontrados estão abaixo dos critérios genéricos da IAEA relacionados à redução do risco de efeitos estocásticos. Os resultados da modelagem de dispersão radioativa e cálculos de dose de radiação foram integrados ao Google Earth Pro para visualizar o impacto radiológico causado por esse hipotético acidente nuclear. Mapas digitais de dados demográficos e de uso da terra são sobrepostos no Google Earth Pro para uma estimativa de impacto mais precisa para obter respostas de emergência ideais. As simulações consideraram doze valores para a velocidade do vento, uma para cada mês do ano, e a classe de estabilidade atmosférica D de Pasquill-Gilfford que é predominante na região.

Em Cao (2016) uma modelagem de dispersão atmosférica e cálculos de dose de radiação foram realizados para um hipotético acidente de SGTR em um AP1000, usando o software HotSpot. A dose equivalente efetiva total, a concentração de ar respirável integrada no tempo e a deposição no solo foram calculados para as várias classes de estabilidade atmosférica, as seis categorias de estabilidade Pasquill-Gilfford, A-F, com condições meteorológicas médias específicas do local, considerando uma velocidade do vento igual a 2,2 m/s. Os resultados indicaram que os valores máximos da deposição no solo na linha central da pluma e da dose equivalente efetiva total estão muito abaixo dos limites regulamentares anuais de 1 mSv para o público, conforme estabelecido pela IAEA. Os radionuclídeos liberados podem ser transportados para longas distâncias, mas não terão nenhum efeito prejudicial ao público.

Em Shaat (2019) foi desenvolvido um trabalho concentrado no cálculo das liberações atmosféricas dos materiais radioativos provenientes do acidente da Usina Nuclear Fukushima Daiichi (F-D), unidade 1, que foram calculadas pela Tokyo Electric Power Company (TEPCO) e a autoridade de energia atômica egípcia (EAEA). O software HotSpot foi usado para calcular a distribuição da taxa de dose resultante da submersão no ar da pluma e da emissão do solo de depósitos radioativos na superfície do solo. Foi considerada a classe de estabilidade atmosférica D de Pasquill-Gilfford e uma velocidade do vento de 3,0 m/s. A densidade de deposição para o I-131 e Cs-137 em alguns locais ao redor de usina foram calculados também usando o código

HotSpot e os resultados mostraram boa concordância com as medições de autoridades Japonesas.

Em Gyamfi (2020a) uma modelagem de dispersão atmosférica e análise de segurança radiológica foram realizadas para um cenário de acidente postulado de uma usina nuclear VVER-1000 genérica usando o software HotSpot. Foi considerada a hipótese de um LOCA em uma situação extrema de liberação da pluma radioativa, sendo lançados 49 radionuclídeos na atmosfera. A dose efetiva total equivalente, a concentração de ar respirável integrada no tempo e a concentração de deposição no solo foram calculados considerando as condições meteorológicas específicas do local, que consideram a classe de estabilidade A de Pasquill-Gilfford e uma velocidade de 1,5 m/s. Os resultados mostraram que os valores máximos de dose efetiva total equivalente e concentração de deposição no solo estão muito abaixo dos limites regulamentares anuais de 1 mSv de exposição pública em um ano, mesmo no caso de pior cenário de acidente, conforme definido pela IAEA. Também foi observado que o órgão com maior valor de dose efetiva comprometida equivalente parece ser a tireoide, seguido pela superfície óssea, pulmão, medula óssea vermelha e parede inferior do intestino grosso em ordem decrescente do valor da dose efetiva comprometida equivalente. Os radionuclídeos I-131, I-133, Sr-89, Cs-134, Ba-140, Xe-133 e Xe-135 foram considerados os principais contribuintes para a dose efetiva comprometida equivalente.

Em Gyamfi (2020b) o autor ampliou a simulação anterior considerando, além do HotSpot, o código InterRAS. As condições meteorológicas específicas consideraram as classes de estabilidade A, D e F de Pasquill-Gilfford e, para cada uma delas, as velocidades de 1,5 m/s, 4,0 m/s e 6,0 m/s.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. RADIAÇÃO NUCLEAR

A radiação nuclear é bem definida pelas seguintes linhas:

Radiação nuclear é o nome dado às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, para atingir a estabilidade. Devido à intensidade das forças atuantes dentro do núcleo atômico, as radiações nucleares são altamente energéticas quando comparadas com as radiações emitidas pelas camadas eletrônicas (TAUHATA et al., 2014, p.19).

Um elemento radioativo é um elemento que pode decair devido ao desequilíbrio de energia mencionado acima, um processo que pode levar menos de um segundo ou bilhões de anos. À medida que esses elementos instáveis, conhecidos como radionuclídeos, decaem, eles frequentemente se tornam um elemento diferente, além de liberar energia, que é medida em elétron-volts (eV) (WNA, 2020). Muitos radionuclídeos existem na natureza, encontrados no meio ambiente e em estrelas, mas muitos também são criados artificialmente em reações nucleares, como em reatores nucleares e aceleradores de partículas. A radiação particularmente associada à medicina nuclear e ao uso de energia nuclear, junto com os raios X, é a radiação “ionizante”, que significa que a radiação tem energia suficiente para interagir com a matéria, principalmente com o corpo humano, e produzir íons, ou seja, pode ejetar um elétron de um átomo. Essa interação entre a radiação ionizante e o tecido vivo pode causar danos (WNA, 2020).

3.1.1. Tipos de Radiações

Existem quatro tipos principais de radiação: alfa, beta, raios gama, nêutrons e produtos de fissão. Elas diferem em massa, energia e quão profundamente eles penetram nos materiais, inclusive no tecido humano. A radiação nuclear surge de centenas de diferentes tipos de átomos instáveis. A seguir são descritas brevemente cada uma dessas radiações:

2.1.1.1. Partículas Alfa

Partículas alfa (α) consistem em dois prótons e dois nêutrons e, portanto, são carregadas positivamente. Em geral os núcleos alfa-emissores têm número atômico elevado (o núcleo pode se tornar instável devido à repulsão elétrica entre os prótons, superando a força nuclear atrativa, de curto alcance, da ordem do diâmetro nuclear) e, para alguns deles, a emissão pode ocorrer espontaneamente (TAUHATA et al., 2014). Geralmente são muito energéticos, mas devido ao seu grande tamanho, não podem viajar muito antes de perderem essa energia. Eles são interrompidos por uma folha de papel ou pele e só são um problema potencial de saúde se forem ingeridos ou inalados. O grande tamanho das partículas alfa, em termos relativos, e a alta energia são fundamentais para compreender a sua alta capacidade de ionização e seus impactos na saúde. Quando dentro do corpo humano, as partículas alfa podem causar danos às células e ao DNA, pois seu tamanho torna mais provável a interação com a matéria. Se a dose for muito alta para que os reparos sejam feitos de maneira satisfatória, há um aumento potencial no risco de desenvolver câncer mais tarde na vida. Exemplos de emissores alfa: urânio-238, radônio-222, plutônio-239 (WNA, 2020).

2.1.1.2. Partículas Beta

Partículas beta (β) é o termo usado para descrever elétrons de origem nuclear, carregados positivamente (β^+) - pósitrons - ou negativamente (β^-) - negatrons. Sua emissão constitui um processo comum em núcleos de massa pequena ou intermediária, que possuem excesso de prótons ou de nêutrons em relação à estrutura estável correspondente (TAUHATA et al., 2014). A radiação (β^-) ocorre quando um núcleo tem excesso de nêutrons em seu interior e, portanto, falta de prótons, fazendo com que o mecanismo de compensação ocorra através da transformação de um nêutron em um próton mais um elétron, que é emitido no processo de decaimento. Já a emissão de radiação do tipo (β^+) ocorre pelo mecanismo de compensação que transforma um próton em um nêutron e emitindo um pósitron (TAUHATA et al., 2014). As partículas beta têm 1/8000 do tamanho de uma partícula alfa, o que significa que ela pode viajar ainda mais antes de ser interrompida, mas uma folha de alumínio é suficiente para parar as partículas beta. Da mesma forma, seu pequeno tamanho resulta em seu poder ionizante ser consideravelmente menor do

que o das partículas alfa (cerca de 10 vezes). Isso decorre do fato de que o corpo humano (e toda a matéria em geral) é composto principalmente de espaço “vazio”. Quanto menor a partícula, menor o risco de colisão com partes do átomo, o que, por sua vez, diminui o risco de danos. Exemplos de emissores beta: cézio-137, estrôncio-90, hidrogênio-3 (trítio) (WNA, 2020).

2.1.1.3. Radiação Gama

A radiação gama (γ) são ondas eletromagnéticas de alta energia, muito parecidas com os raios-X. Eles são emitidos em diversos decaimentos radioativos e podem ser muito penetrantes, portanto, requerem blindagem mais substancial. A energia dos raios gama depende da fonte específica. Quando nucleons são deslocados para estados de energias disponíveis, formando os estados excitados, no restabelecimento do equilíbrio eles emitem a energia absorvida sob a forma de radiação gama (TAUHATA et al., 2014). Os raios gama são uma das principais preocupações para as pessoas que lidam com materiais radioativos selados (fontes seladas) usados, por exemplo, em medidores industriais e máquinas de radioterapia. Crachás de dose de radiação são usados por trabalhadores em situações expostas para monitorar a exposição (WNA, 2020).

2.1.1.4. Nêutrons

Os nêutrons são partículas sem carga elétrica e são produzidos principalmente pela fissão nuclear e, portanto, raramente são encontrados fora do núcleo de um reator nuclear. Os nêutrons podem ser também produzidos utilizando o bombardeio do berílio com partículas alfa emitidas por um radionuclídeo, gerando-se um feixe de nêutrons de alto fluxo, a partir das reações nucleares produzidas no berílio (TAUHATA et al., 2014). Os nêutrons são o único tipo de radiação que pode tornar outros materiais não radioativos em radioativos. Nêutrons rápidos (de alta energia) podem ser muito destrutivos para o tecido humano (WNA, 2020). Os nêutrons, por não terem carga elétrica, não interagem muito bem com os materiais e podem percorrer um longo caminho. A única maneira de blindá-los é com grandes quantidades de água ou outros materiais feitos de átomos muito leves (NRC, 2020).

2.1.1.5. Fragmentos de Fissão

Em uma típica reação de fissão nuclear é emitida uma grande variedade de produtos de fissão, incluindo vários nêutrons e gamas, betas e neutrinos e, em média, dois núcleos conhecidos como os fragmentos de fissão. Quando os fragmentos de fissão são formados, eles são excessivamente ricos em nêutrons. De modo que eles contêm mais nêutrons do que são necessários para as suas estabilidades. Como resultado, os fragmentos de fissão decaem emitindo uma sequência de raios β negativos, e que são acompanhados de vários raios γ .

2.1.2. Cálculo do Decaimento

Conforme foi mostrado anteriormente, certos núcleos são instáveis, no sentido de que podem sofrer uma transformação espontânea em um nuclídeo diferente e que é geralmente acompanhada pela emissão de partículas energéticas. Essa transformação nuclear espontânea também é conhecida como decaimento radioativo. A lei fundamental que descreve o decaimento radioativo é baseada na observação experimental de que a probabilidade de um núcleo decair em um determinado intervalo de tempo é essencialmente constante, independentemente da idade do núcleo ou de seu ambiente, dependendo apenas do tipo do próprio núcleo (DUDERSTADT, 1976). Portanto, a taxa de mudança do número de núcleos originais de um determinado tipo deve ser proporcional ao número de núcleos presentes naquele momento. Assim, definindo λ a constante de proporcionalidade e $N(t)$ o número de núcleos originais no tempo t , tem-se a seguinte equação:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) \quad (1)$$

onde λ é referido como a constante de decaimento radioativo característica do núcleo e tem unidades de inverso do tempo. Se inicialmente tivermos N_0 núcleos presentes, então em qualquer momento posterior t o número de núcleos presentes será dado por uma lei exponencial:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Uma vez que a decaimento radioativo é um fenômeno estatístico, não podemos prever com precisamente quando um dado núcleo decairá. No entanto, podemos calcular o tempo de vida médio \bar{t} do núcleo antes de decair usando (DUDERSTADT, 1976):

$$\bar{t} \equiv \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$

Portanto, em média, um dado núcleo decairá após um tempo $1/\lambda$. Uma quantidade intimamente relacionada é o intervalo de tempo necessário para que metade do número original de núcleos presentes decaia. Esse tempo, $T_{1/2}$, é referido como meia-vida radiativa ou simplesmente meia-vida do núcleo. A meia-vida é dada por:

$$T_{1/2} \equiv \frac{0,693}{\lambda}. \quad (4)$$

Finalmente, outra definição de importância é a da atividade, A , que caracteriza uma amostra de material radioativo (DUDERSTADT, 1976). Esta quantidade é simplesmente o número total de transformações que ocorrem por segundo dada por:

$$A \equiv \lambda N(t). \quad (5)$$

A atividade é geralmente medida em unidade de curie, onde um curie (Ci) é definido como aquela quantidade de núcleos radioativos para o qual o número de transformações por segundo é igual a $3,7 \times 10^{10}$, que corresponde aproximadamente a atividade de 1 g de rádio. Já no Sistema Internacional de Unidades a unidade é denominada becquerel (Bq) e que representa uma transformação por segundo.

2.1.3. Efeitos biológicos das radiações ionizantes

A radiação ionizante afeta os seres vivos no nível atômico por meio da ionização das células. Quando a radiação atinge uma célula, qualquer uma das seguintes situações pode acontecer (ANS, 2020):

- ✓ Pode não haver alteração à medida que passa pela célula;
- ✓ Pode haver algum dano, mas a célula se repara sozinha;
- ✓ A radiação pode alterar a capacidade da célula de se reproduzir e causar uma mutação;
- ✓ A célula pode morrer.

Além disso, há evidências que sugerem que, a menos que a exposição à radiação atinja dez vezes o nível normal da radiação de fundo, não há danos aos seres humanos com a radiação. Também, parece haver evidência de que a radiação no nível normal da radiação de fundo ou próximo a ele pode ser benéfica e até necessária para a vida (ANS, 2020).

Para baixos níveis de exposição à radiação (abaixo de 10.000 mrem), os efeitos biológicos são tão pequenos que podem nem ser detectados. Os mecanismos naturais de reparo do corpo geralmente reparam qualquer dano às células antes que qualquer efeito seja sentido ou detectado. Este efeito protetor de baixos níveis de radiação é chamado de “Hormose de radiação” (ANS, 2020).

2.2. GRANDEZAS RADIOLÓGICAS

2.2.1. Dose Absorvida

A quantidade dosimétrica fundamental na proteção radiológica é a dose absorvida, D . É definida como sendo a energia absorvida por unidade de massa:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (6)$$

onde $d\bar{\epsilon}$ é a energia média depositada em um ponto de interesse, em um meio de massa dm (ICRP 60, 1991). A sua unidade é o joule por quilograma (J/Kg) no Sistema Internacional de Unidades, que recebe o nome especial de gray (Gy). A dose absorvida é definida em termos que permitem que seja especificada em um ponto, mas pode ser usada para significar a dose média sobre um tecido ou órgão (ICRP 60, 1991).

2.2.2. Dose Equivalente

Em proteção radiológica, esta é a dose absorvida calculada em um tecido ou órgão (ao invés de em um ponto) e ponderada para a qualidade da radiação que é de interesse (ICRP 60, 1991). O fator de ponderação para este fim é denominado fator de ponderação da radiação, w_R , e é selecionado pelo tipo e energia da radiação incidente no corpo ou, no caso de fontes dentro do corpo, emitida pela fonte. Esta dose absorvida ponderada é estritamente uma dose, e é chamada de dose equivalente em um tecido ou órgão, denotada pelo símbolo H (ICRP 60, 1991). A dose equivalente no tecido T é dada pela expressão

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (7)$$

onde $D_{T,R}$ é a dose média absorvida sobre o tecido ou órgão T , devido a radiação R . A unidade da dose equivalente é J/Kg e recebe o nome especial de sievert (Sv).

2.2.3. Dose Equivalente Comprometida

Após a ingestão ou inalação de um material radioativo pelo corpo, há um período durante o qual o material dá origem a doses equivalentes nos tecidos e órgãos do corpo em taxas variáveis (ICRP 60, 1991). Essa dose equivalente produzida pode ser significativa durante o resto da vida do indivíduo. Uma vez que o material é retido, ou comprometido ao indivíduo, pouco se pode fazer para evitar a futura dosagem. A integral no tempo da taxa de dose equivalente é chamada de dose equivalente comprometida (*committed equivalent dose*, CED), $H_T(\tau)$:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \frac{dH_T(t)}{dt} dt \quad (8)$$

onde t_0 é o instante que ocorre a ingestão ou inalação e τ é o tempo de integração (em anos) após a incorporação (TAUHATA et al., 2014). Nesta dissertação é empregado o tempo $\tau = 50$ anos. A unidade da dose equivalente comprometida é o sievert (Sv).

2.2.4. Dose Efetiva

A dose equivalente para os tecidos e órgãos individuais pode ser combinada (por meio do uso de fatores de peso do tecido) para calcular a soma das doses equivalentes aplicada em todo o corpo. Quando isso é feito, a dose resultante é denominada de dose efetiva (HOMANN, 2014). Portanto, a dose efetiva pode ser dada pela seguinte expressão:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (9)$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão T e w_T é o fator de ponderação de cada tecido ou órgão (CNEN, 2014). A unidade da dose efetiva também é o sievert (Sv).

2.2.5. Dose Efetiva Comprometida

A dose efetiva comprometida é o somatório da dose equivalente comprometida nos órgãos e tecidos individuais (usando os fatores de ponderação apropriados) para calcular a dose combinada aplicada em todo o corpo incorporada no tempo τ (HOMANN, 2014).

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau). \quad (10)$$

Sua unidade é o sievert (Sv).

2.2.6. Dose Efetiva Total

O material radioativo que produz a dose equivalente pode ser externo ao corpo (por exemplo, quando o material está no solo ou no ar ao redor do indivíduo), ou interno (por exemplo, quando o indivíduo ingeriu, ou inalou e reteve o material). A dose efetiva total (total effective dose, TED) é a soma da dose efetiva (causado pelo material externo) e da dose equivalente comprometida efetiva (causado pelo material interno). O TED é a expressão mais completa da dose combinada de todas as vias de entrega aplicáveis (HOMANN, 2014). Sua unidade é o sievert (Sv).

2.3. ACIDENTES DE BASE DE PROJETO

Na análise de segurança de reatores nucleares os Acidentes de Base de Projeto (Design Basis Accidents, DBAs) são escolhidos por métodos determinísticos ou com o auxílio de considerações probabilísticas, para projetar todos os sistemas da planta nuclear, mas principalmente os sistemas de segurança (PETRANGELI, 2006).

Os acidentes por perda de refrigerante (Loss-of-coolant accidents, LOCAs) são um tipo de acidente de reator que é amplamente estudado. Desde os primórdios da geração de energia nuclear, estes acidentes são considerados os mais graves dos DBAs. Continuam assim até hoje, pois originam grande parte das especificações dos sistemas de segurança da planta nuclear (PETRANGELI, 2006). Esses acidentes são o cenário proeminente ao qual os sistemas de proteção e as práticas operacionais foram projetados para responder. Como o nome sugere, um LOCA descreve um evento em que o refrigerante é perdido do reator. O cenário mais dramático em que isso pode acontecer é conhecido como LOCA de grande quebra (LBLOCA), em que uma falha de dupla extremidade ocorre (muitas vezes referida como uma ruptura de guilhotina) de um dos tubos de refrigeração, perna fria, do circuito primário principal servindo ao vaso de pressão do reator. Os LBLOCAs são normalmente especificados para uma ruptura com uma área transversal total igual ou superior a $\sim 0,1 \text{ m}^2$ para o fluxo do refrigerante. Este evento não é esperado que ocorra durante a vida útil da planta nuclear, mas é postulado como uma base de projeto conservadora (JOYCE, 2020).

Nesta dissertação será considerado o acidente postulado de um LOCA em um reator nuclear de um genérico PWR. Uma descrição do circuito primário do PWR é mostrada na Figura 1.

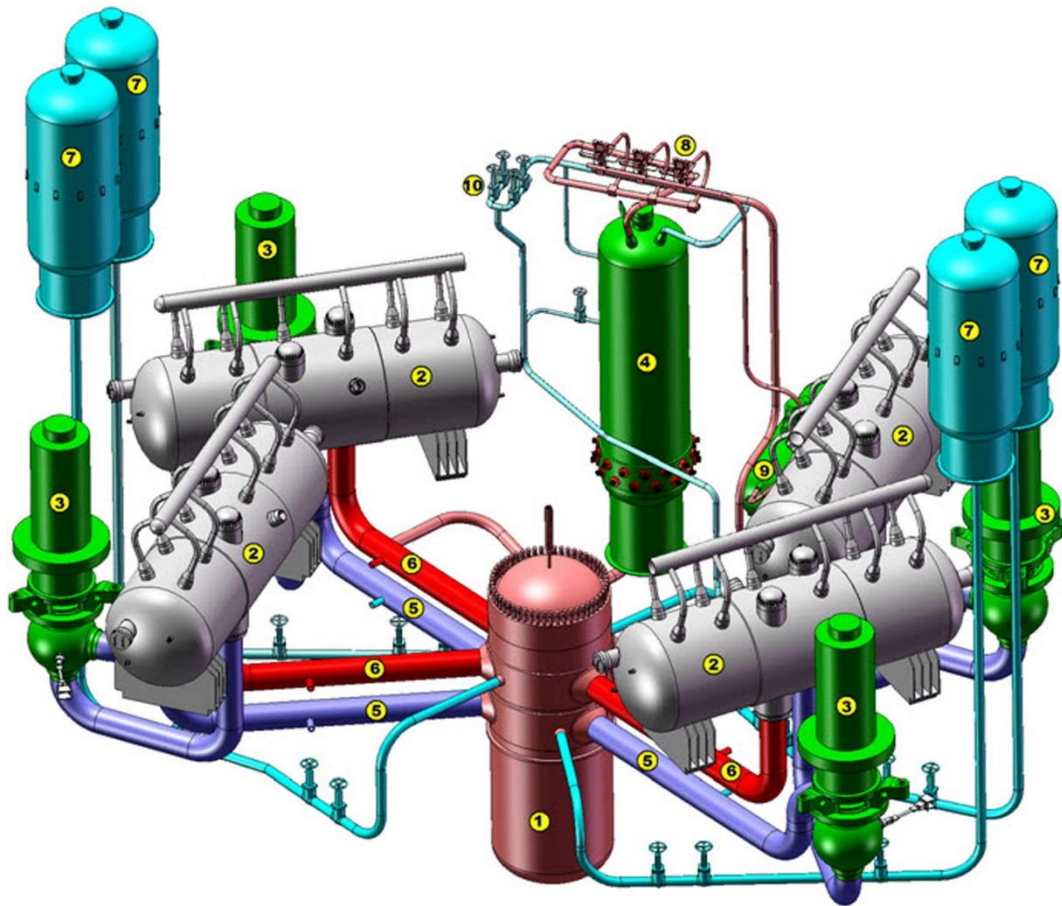


Figura 1: Circuito Primário do PWR: (1) Vaso do Reator, (2) Gerador de Vapor, (3) Bomba do Refrigerante, (4) Pressurizador, (5) Perna Fria, (6) Perna Quente, (7) Acumulador, (8) Válvula de Segurança, (9) Tanque de Mitigação, (10) Sistema de Injeção. (TABADAR, et al, 2018).

2.4. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A dispersão atmosférica pode ser definida como sendo o fenômeno que implica o transporte de efluente pelos ventos e simultaneamente a difusão pela turbulência atmosférica. Um modelo de dispersão atmosférica é uma relação matemática entre a quantidade (ou taxa) de lançamento de efluente e a distribuição de sua concentração na atmosfera. Fisicamente, a relação surge através das propriedades dos movimentos atmosféricos (vento e turbulência) que provocam a dispersão e, portanto, podem ser consideradas em função dos parâmetros meteorológicos que os

controlam. Em um contexto mais amplo, um modelo também pode incluir efeitos de outros processos além da difusão que afetam a concentração, por exemplo, o decaimento radioativo, o esgotamento devido à deposição e eliminação pela chuva e efeitos de modificação de fluxo devido à não homogeneidade horizontal (IAEA, 1986). Atualmente existem diversos modelos matemáticos para simular a dispersão atmosférica e podemos citar os eulerianos, lagrangeanos, gaussianos. Um dos modelos mais empregados é o modelo de dispersão atmosférica gaussiano.

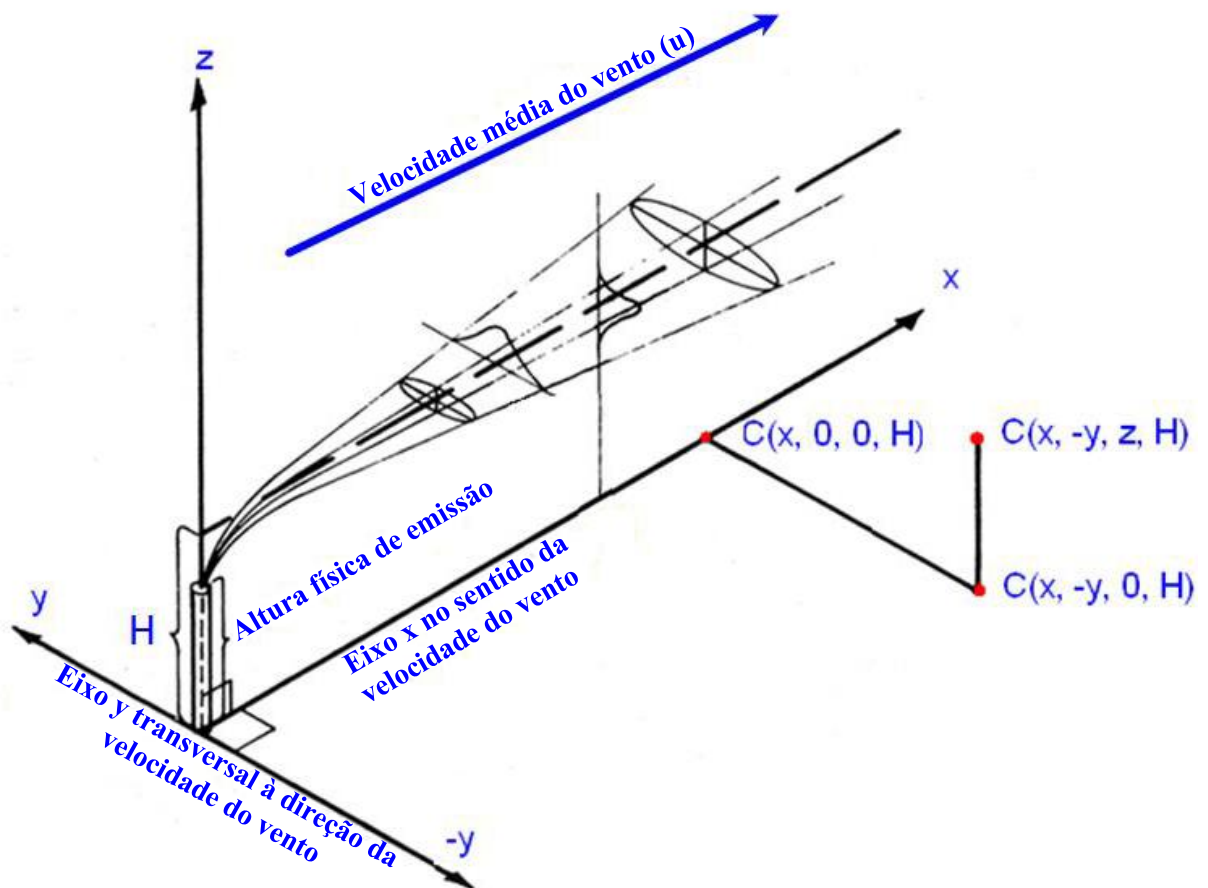


Figura 2: Sistema de coordenadas do modelo de dispersão atmosférica gaussiano. Adaptado de HOMANN, (2014).

O modelo gaussiano geralmente produz resultados que concordam bem com os dados experimentais em condições meteorológicas e de terreno simples e, como resultado, encontrou seu espaço na maioria dos guias governamentais. Na Figura 2 é apresentado o sistema de coordenadas utilizado no modelo gaussiano. O eixo x é o eixo a favor do vento, estendendo-se horizontalmente com o solo na direção da velocidade média do vento. O eixo y é o eixo da transversal à direção da velocidade média do vento, perpendicular ao eixo a favor do vento,

também estendendo-se horizontalmente. O eixo z se estende verticalmente a partir do solo. A concentração atmosférica integrada no tempo é dada por $C(x, y, z, H)$, onde H é a altura efetiva de emissão da pluma. O modelo gaussiano será abordado com mais detalhes no capítulo 4.

4. SOFTWARE HOTSPOT

O programa HotSpot Health Physics Codes ou HotSpot foi desenvolvido pelo laboratório americano Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). O programa HotSpot, fornece uma aproximação de primeira ordem dos efeitos da radiação associados à liberação atmosférica de materiais radioativos. O programa HotSpot foi criado para equipar o pessoal de resposta a emergências e planejadores com um conjunto rápido e portátil de ferramentas de software para avaliar incidentes envolvendo material radioativo. O software também é usado para análise de segurança de instalações que manuseiam material radioativo. Este programa é projetado para estimativas de curto alcance (menos de 10 km) e curto prazo (menos de algumas horas) (HOMANN, 2014).

A biblioteca de radionuclídeos do código HotSpot incorpora os Federal Guidance Reports 11, 12 e 13 (FGR-11, FGR-12, FGR-13) os Fatores de Conversão de Dose (DCFs) para inalação, submersão e emissão do solo. Além dos DCFs equivalentes a dose efetiva comprometida de 50 anos por inalação, estão disponíveis para estimar os efeitos determinísticos dos DCFs de doses agudas (1, 4, 30 dias).

4.1. EQUAÇÃO GAUSSIANA

O algoritmo do código HotSpot utiliza a seguinte equação do modelo gaussiano para a dispersão atmosférica que determina a concentração atmosférica integrada no tempo de um gás ou aerossol em qualquer ponto do espaço:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (11)$$

Se a opção de camada de inversão estiver sendo aplicada, e se σ_z exceder a camada de inversão (L), a seguinte equação é usada:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y L u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (12)$$

onde:

$C(x, y, z, H)$ = Concentração atmosférica integrada no tempo em um ponto (x, y, z) e para uma altura efetiva de liberação H [(Ci. s)/ m^3];

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 horizontal [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.

4.2. CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

No modelo de dispersão e transporte gaussiano, os desvios padrões nas direções horizontal e vertical (σ_y e σ_z , respectivamente) são normalmente determinados a partir de curvas estabelecidas mostrando σ_y e σ_z como uma função da estabilidade atmosférica e distância a favor do vento. A estabilidade atmosférica é inferida a partir de dados meteorológicos medidos e / ou observados (EPA, 2000), (THOMAN, 2009) e é influenciada diretamente pela turbulência.

A turbulência da camada limite atmosférica é considerada como tendo duas fontes. Em primeiro lugar, turbulência mecânica causada por elementos de rugosidade, por exemplo, características de superfície irregulares, vegetação, árvores, edifícios etc. que geram turbulência à medida que o vento sopra sobre suas superfícies ásperas e ondas turbulentas se formam. À medida que a velocidade do vento aumenta, a turbulência mecânica aumenta devido ao aumento do cisalhamento do vento perto da superfície. Em segundo lugar, a flutuabilidade (ou turbulência gerada termicamente) é causada pelo aquecimento do sol na superfície da terra ou por qualquer mecanismo que forneça uma fonte de ar quente e flutuante perto da superfície. O ar quente próximo à superfície pode produzir grandes estruturas de redemoinho térmico e gradientes térmicos verticais instáveis em condições de baixa velocidade do vento. À medida que a velocidade do vento se torna muito forte, no entanto, as grandes estruturas de redemoinhos térmicos são destruídas pelo cisalhamento do vento (THOMAN, 2009).

As classes de Pasquill-Gifford para dispersão atmosférica são uma forma simplificada de determinar o nível de intensidade de turbulência. A intensidade da turbulência é o fator subjacente para determinar a quantidade de propagação de uma nuvem em dispersão conforme ela se move a favor do vento. Pasquill primeiro usou os desvios padrão das flutuações da direção do vento vertical e horizontal para determinar a intensidade da turbulência (PASQUILL, 1961). Ele então expressou os coeficientes de dispersão, σ_y e σ_z , para a propagação horizontal e vertical de um nível do solo ou pluma elevada, em termos dessas flutuações. O problema prático com esta abordagem é que as flutuações da direção do vento só podem ser medidas com instrumentos bastante especializados (por exemplo, palhetas de vento bidirecionais). Gifford forneceu um esquema de tipagem de turbulência para relacionar o gradiente de temperatura com os desvios padrão das flutuações da direção do vento (GIFFORD, 1961). Seis categorias designadas com as letras A-F foram usadas para relacionar a quantidade de propagação da pluma dispersante conforme ela se movia contra o vento. Essas categorias foram baseadas nos resultados de experimentos de dispersão que foram realizados durante o projeto Prairie Grass nos EUA durante a década de 1950 (HAUGEN, 1959), (THOMAN, 2009).

As classes de estabilidade A-F foram concebidas para refletir o estado de estabilidade atmosférica. As categorias instáveis A, B e C refletem o aquecimento solar diurno e as categorias estáveis E e F refletem as condições noturnas. Na época em que Pasquill e Gifford desenvolveram as classes de dispersão, a classe neutra D foi presumida para representar o estado de transição entre o nascer do sol da manhã e o início do aquecimento solar, ou o período

próximo ao pôr do sol quando o aquecimento solar desaparece e a superfície começa a esfriar por radiação processos (THOMAN, 2009). Com o passar do tempo, o importante papel da velocidade do vento na promoção de condições de estabilidade neutra tornou-se mais bem compreendido (THOMAN, 2009). As classes de estabilidade de Pasquill são definidas em termos do desvio padrão observado nas flutuações do vento na direção horizontal, σ_θ , conforme pode ser verificado na Tabela 1.

Tabela 1: As classes de estabilidade de Pasquill.

Classe de Estabilidade	Característica	σ_θ (em graus)
A	Extremamente Instável	25
B	Moderadamente Instável	20
C	Ligeiramente Instável	15
D	Neutro	10
E	Ligeiramente Estável	5
F	Moderadamente Estável	2,5

Uma vez que a categoria de estabilidade atmosférica foi determinada, o código HotSpot usa as equações fornecidas nas Tabelas 2 e 3 para estimar σ_y e σ_z considerando dois tipos de terreno: padrão e cidade. O fator de terreno da cidade é responsável pelo aumento da dispersão da pluma de estruturas aglomeradas e pelas características de retenção de calor das superfícies urbanas, como asfalto e concreto. O fator de terreno da cidade estimará concentrações mais baixas do que o fator padrão, devido ao aumento da dispersão de grandes estruturas e materiais urbanos (HOMANN, 2014).

Para aqueles não familiarizados com as diferentes classificações de estabilidade, o HotSpot seleciona a classificação de estabilidade apropriada com base nos dados de entrada fornecidos pelo usuário ou o usuário pode selecionar e forçar diretamente uma classificação de estabilidade específica (HOMANN, 2014).

Entre as diversas propriedades meteorológicas que o usuário pode escolher ou ajustar na entrada dos dados, é necessário inserir a velocidade do vento referente à altura de 10 metros. É possível

colocar valores dessa velocidade entre $0,1 \text{ m/s}$ e 50 m/s . Como as Equações 11 e 12 precisa da velocidade do vento na altura efetiva H de liberação da pluma, o código ajusta automaticamente essa velocidade do vento considerando a velocidade do vento em 10 metros (HOMANN, 2014).

Para agilizar a avaliação inicial de acidentes radiológicos o código HotSpot possui uma interface que permite optar por um dos diversos modelos pré-configurados de dispersão atmosférica, quais sejam: explosão de plutônio (não nuclear), incêndio com plutônio, ressuspensão com plutônio, explosão de urânio (não nuclear), incêndio com urânio, lançamento de trítio, explosão geral, incêndio geral, ressuspensão geral e pluma geral. Exemplos de cenários para cada um dos tipos de modelos de dispersão pré-configurados estão disponíveis ao usuário. Além de fornecer esses exemplos, o HotSpot permite ao usuário salvar um cenário e criar e editar uma mistura de radionuclídeos. Podem ser incluídos até 50 radionuclídeos para criar uma mistura, definindo o termo de fonte (HOMANN, 2014).

Tabela 2: Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno padrão (HOMANN, 2014).

Classes de Estabilidade	$\sigma_y \text{ (m)}$	$\sigma_z \text{ (m)}$
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	$\frac{0,06x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,030x}{1 + 0,0003x}$
F	$\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,016x}{1 + 0,0003x}$

Tabela 3: Desvios Padrões σ_y e σ_z para terreno urbano (HOMANN, 2014).

Classes de Estabilidade	σ_y (m)	σ_z (m)
A e B	$\frac{0,32x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$0,24x\sqrt{1 + 0,001x}$
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 e F	$\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$	$\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$

4.3. DOSE NA PASSAGEM DA PLUMA

O código HotSpot assume que o indivíduo alvo permaneça no mesmo local a favor do vento, no ponto (x, y, z) , durante a passagem da pluma e a duração padrão da liberação do material radioativo é de 10 minutos. Se o cenário que está sendo modelado tenha uma duração de liberação diferente, é possível alterar o tempo de amostragem (HOMANN, 2014).

4.4. FATORES DE CONVERSÃO DE DOSE

O HotSpot usa as metodologias de dosimetria de radiação recomendadas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection, ICRP) (HOMANN, 2014). Essas metodologias estão resumidas no Federal Guidance Report No. 11 (ECKERMAN et al., 1988), Federal Guidance Report No. 12 (ECKERMAN et al., 1993) e Federal Guidance Report No. 13 (ECKERMAN et al., 1999). O FGR-11 fornece coeficientes de dose na forma de equivalentes de dose integrados em 50 anos para inalação aguda de radionuclídeos e é baseado nos modelos biocinéticos e dosimétricos da Publicação 30 do ICRP (1979, 1980, 1981, 1988). O FGR-12 fornece coeficientes de dose na forma de dose

por unidade de exposição integrada no tempo para exposição externa a radionuclídeos no ar, água ou solo. O FGR-13 fornece coeficientes de dose usando o novo modelo de pulmão ICRP-66 e metodologias ICRP série 60/70 (HOMANN, 2014).

5. METODOLOGIA

Para simular o impacto radiológico de um acidente base de projeto (DBA) foi utilizado o software HotSpot, Versão 3.0.3, considerando um termo de fonte gerado por um acidente por perda de refrigerante (LOCA) de um reator genérico do tipo PWR e as condições atmosféricas do local. A caracterização do termo de fonte devido ao LOCA será a mesma empregada em Gyamfi (2020a, 2002b). Conforme foi visto no capítulo 2, Bulhosa (2018) utilizou um valor para a velocidade do vento e as seis classes de estabilidade de Pasquill-Gilfford, Yuniarto (2019) utilizou doze valores para a velocidade do vento e uma classe de estabilidade de Pasquill-Gilfford e Gyamfi (2020b) considerou três classes de estabilidade de Pasquill-Gilfford e, para cada uma delas, três valores para a velocidade do vento. Nesta dissertação serão consideradas as seis classes de estabilidade de Pasquill-Gilfford e, para cada uma delas, doze valores da velocidade do vento. O software HotSpot permite o ajuste de diversos parâmetros relativos ao termo de fonte e sobre as condições meteorológicas do local. Nas simulações realizadas neste trabalho serão consideradas as configurações básicas do HotSpot, pois o objetivo é tentar estimar como a pluma radiativa se comporta quando se variam a velocidade do vento e as classes de estabilidade de Pasquill-Gilfford.

5.1. CENÁRIO DO LOCA E DEFINIÇÃO DO TERMO DE FONTE

A análise do impacto radiológico de um DBA tipo LOCA em um genérico núcleo PWR de 1000 MW foi baseada na hipotética liberação de radionuclídeos do núcleo do reator para a atmosfera após passar por várias barreiras de retenção. Foi considerada uma ruptura da perna fria (ver Figura 1) do refrigerante do circuito primário próximo ao vaso de pressão do reator representando o LOCA. Uma grande liberação de radionuclídeos só foi possível quando muitas barras de combustível foram substancialmente danificadas. A maneira mais provável de isso ocorrer de forma realista foi pela perda de água do sistema de refrigeração primário, consequentemente deixando o núcleo do reator descoberto pela água. Esse tipo de cenário de acidente ajuda a estimar a magnitude do risco à saúde pública em qualquer liberação radiológica (GYAMFI, 2020a). O cenário de acidente foi adotado com base na análise probabilística de segurança da NRC, que o define como o principal contribuinte da classe de

produto de fissão denominada categoria de termo de fonte (STC). O STC representa uma categoria de termo fonte média que leva em conta a frequência de ocorrência e a consequência do evento de acidente (NRC, 2000 apud GYAMFI, 2020a). É presumido que o LOCA resultou na liberação de radionuclídeo para a sala do reator, que teve seu sistema de ventilação exaustão e purga de gás ambos desligados (GYAMFI, 2020a). Enquanto os membros da equipe de operação tentavam salvar a situação, a atividade de radionuclídeos do núcleo do reator escapou através da chaminé do prédio do reator na forma de gás e particulados e, em seguida, se difundiu na atmosfera. O inventário de radionuclídeos liberado na atmosfera é transportado a favor do vento de acordo com as condições meteorológicas do local (GYAMFI, 2020a).

O termo de fonte produzido pelo LOCA e que foi empregado neste trabalho é o mesmo que foi obtido em Gyamfi, (2020a, 2020b). Conforme essa referência, o termo de fonte foi obtido usando os códigos de análise de física de reatores ORIGEN 2.1 e WIMS-ANL. Os cálculos de queima das células da rede de combustível foram realizados desde o início de vida até a queima de cerca de 55% de perda de U-235 para o combustível. Os radionuclídeos depletados estimados de maior consequência para a saúde (GYAMFI, 2020a) foram usados no código HotSpot para estimativa de doses, como será visto nas próximas seções. O termo fonte de acidente de LOCA para o PWR genérico é mostrado na Tabela 4. A atividade total dos radionuclídeos gerados foi de $1,11\text{E} + 16 \text{ Bq}$.

Tabela 4: Inventário do termo de fonte liberado pelo LOCA.

Nuclídeo	Meia-Vida, $T_{1/2}$	Atividade (Bq)
Ba-137m	2,552 min.	5,98E+13
Ba-140	12,74 dias	2,25E+14
Ce-144	284,3 dias	5,78E+12
Cs-134	2,062 anos	1,06E+14
Cs-136	13,1 dias	1,89E+13
Cs-137	30,0 anos	6,82E+13
Cs-138	32,2 min.	5,28E+11
I-131	8,04 dias	4,69E+14
I-132	2,30 horas	6,18E+14
I-133	20,8 horas	7,66E+14
I-134	52,6 min.	8,88E+12
I-135	6,61 horas	4,03E+14
Kr-85	10,756 anos	3,42E+13
Kr-85m	4,48 horas	2,13E+14
Kr-87	76,3 min.	3,79E+13
Kr-88	2,84 horas	3,36E+14
La-140	40,272 horas	1,85E+13
Mo-99	66,0 horas	7,15E+12
Np-239	2,355 dias	1,03E+14
Pr-144	17,28 min.	5,74E+12
Pr-144m	7,2 min.	1,03E+11
Pu-239	24065 anos	2,77E+06
Rb-88	17,8 min.	2,76E+14
Rh-103m	56,12 min.	5,32E+12
Rh-106	29,8 s	2,60E+12
Ru-103	39,28 dias	5,38E+12
Ru-106	368,2 dias	2,60E+12
Sb-127	3,85 dias	2,04E+13
Sb-129	4,32 horas	3,46E+13
Sr-89	50,5 dias	1,33E+14
Sr-90	29,12 anos	1,15E+13
Sr-91	9,5 horas	9,05E+13
Tc-99m	6,02 horas	7,02E+12
Te-127	9,35 horas	7,56E+12
Te-127m	109 dias	7,72E+09
Te-129	69,6 min.	4,76E+13
Te-129m	33,6 dias	1,94E+13
Te-131	25,0 min.	8,11E+12
Te-131m	30 horas	3,60E+13
Te-132	78,2 horas	4,03E+14
Xe-131m	11,84 dias	2,67E+13
Xe-133	5,243 dias	4,58E+15
Xe-133m	2,19 dias	1,56E+14
Xe-135	9,14 horas	1,51E+15
Xe-135m	15,29 min.	1,91E+14
Xe-138	14,08 min.	3,39E+09
Y-90	64,0 horas	3,01E+11
Y-91	58,51 dias	8,10E+12
Y-91m	49,71 min	3,75E+13

Adaptado de Gyamfi, (2020a, 2020b).

5.2. CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO E ENTRADA DOS DADOS NO HOTSPOT

Além do termo de fonte definido na seção anterior, para que se possa realizar as simulações, o usuário do software HotSpot precisa fornecer outros parâmetros relacionados com as condições climáticas/atmosféricas e com as medidas radiológicas. Na listagem a seguir são mostradas as principais entradas de dados e configurações utilizadas neste trabalho:

- a) Modelo de Dispersão Atmosférica Pré-configurado: Pluma genérica;
- b) Mistura com 49 nuclídeos: Listados na Tabela 4;
- c) Atividade da mistura: $1,11\text{E}+16$ Bq;
- d) Altura efetiva de liberação da pluma: 65 m;
- e) Velocidade do vento ($h = 10$ m): Variando de 0,5 m/s até 6,0 m/s, com intervalos de 0,5 m/s, totalizando 12 valores;
- f) Vento do Sudeste (135°);
- g) Classe de estabilidade: Todas as seis classes de estabilidade classificadas por Pasquill-Gifford: A, B, C, D, E e F;
- h) Altura do receptor: 1,50 m;
- i) Coordenadas de distância: Todas as distâncias são na linha central da pluma;
- j) Tipo do terreno: padrão;
- k) Altura da camada de inversão: Sem camada de inversão;
- l) Tempo da amostra: 10 min;
- m) Taxa de respiração: $4,17\text{E}-04$ m^3/s ;
- n) Velocidade deposição não-respirável: 8,0 cm/s;
- o) Contorno da isodose interior: 1 mSv;
- p) Contorno da isodose mediana: 0,8 mSv;
- q) Contorno da isodose exterior: 0,5 mSv;
- r) Dados de Conversão de Dose da FGR-13 - Dose Efetiva Total (TED);

O item a) corresponde à tela inicial do HotSpot, aba “Models”, com a opção “General Plume” assinalada conforme mostrado na Figura 3. Os itens b) e d) são configurados na aba “Source Term” mostrada na Figura 4. Os itens e), f) e g) são configurados na aba “Meteorology” mostrada pela Figura 5. É nesta tela que são colocados os doze valores para a velocidade e as seis classes de estabilidade, de modo que o HotSpot foi executado 72 vezes para gerar os dados

de interesse. O item h) corresponde a aba “Receptors” mostrada na Figura 6, onde se escolhe a altura do receptor (indivíduo) e é possível configurar até vinte posições para cada receptor. Os itens de j) até r) correspondem a aba “Setup” mostrada na Figura 7. Na Figura 8 é mostrada a tela da aba “Output” que permite configurar os arquivos de saída gerados em cada simulação. Esses arquivos estão na forma de tabelas e gráficos. O conteúdo das tabelas pode ser ajustado conforme a conveniência e o gráficos que correspondem às curvas de contorno das doses e deposição podem ser em geometria simétrica com relação a linha central da pluma ou em geometria de bússola.

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser reproduzidos bastando para isso usar os valores de entrada e as configurações exatamente como estão mostradas nas Figuras de 3 até 8.

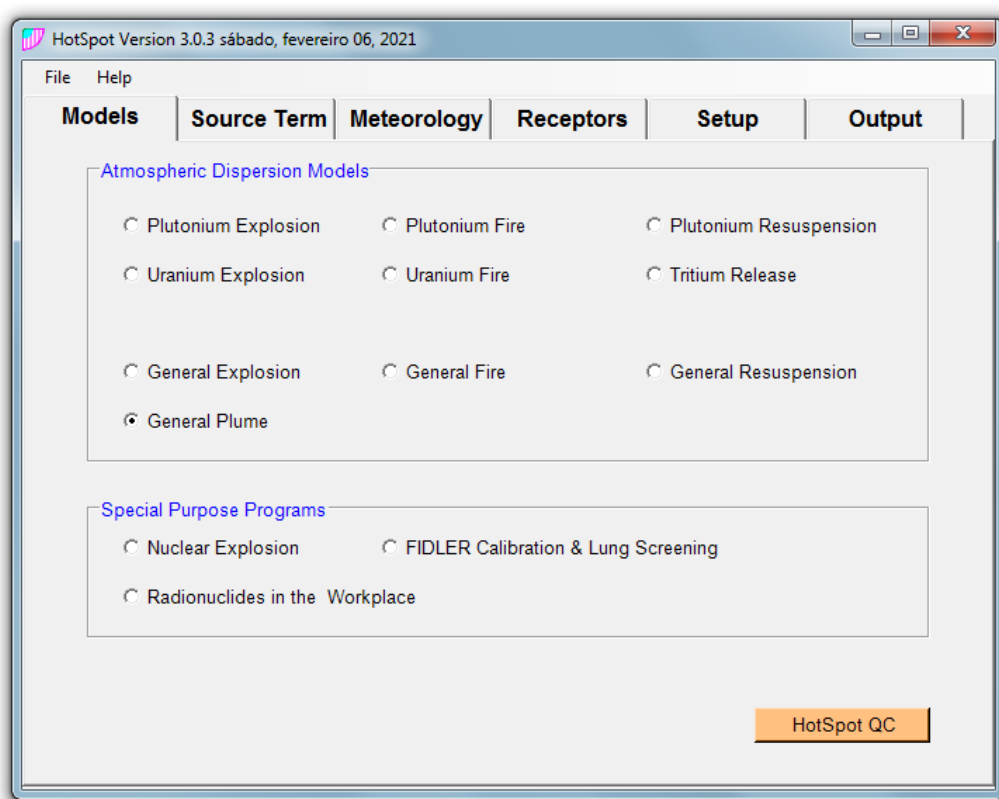


Figura 3: Tela inicial do HotSpot com as opções de modelos de dispersão atmosféricas pré-configuradas.

HotSpot Version 3.0.3 sábado, fevereiro 06, 2021

File Help

Models **Source Term** **Meteorology** **Receptors** **Setup** **Output**

Model : General Plume

Radionuclide: Mistura5.mix

Effective Release Height: 65 m

☐ Calculate Plume Rise

Damage Ratio (DR): 1.000

Leakpath Factor: 1.000

Figura 4: Tela do HotSpot para configurar os dados do termo de fonte.

HotSpot Version 3.0.3 sábado, fevereiro 06, 2021

File Help

Models **Source Term** **Meteorology** **Receptors** **Setup** **Output**

10-meter Wind Speed: 0.50 m/s

☐ Display Wind Chart

Selected Stability Class: A

Wind Direction: 135
 Wind from the SE

Atmospheric Stability

Enter Solar Information - or - Enter the Actual Stability

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

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

Figura 5: Tela do HotSpot para configurar os dados da velocidade do vento em 10 metros e as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford.

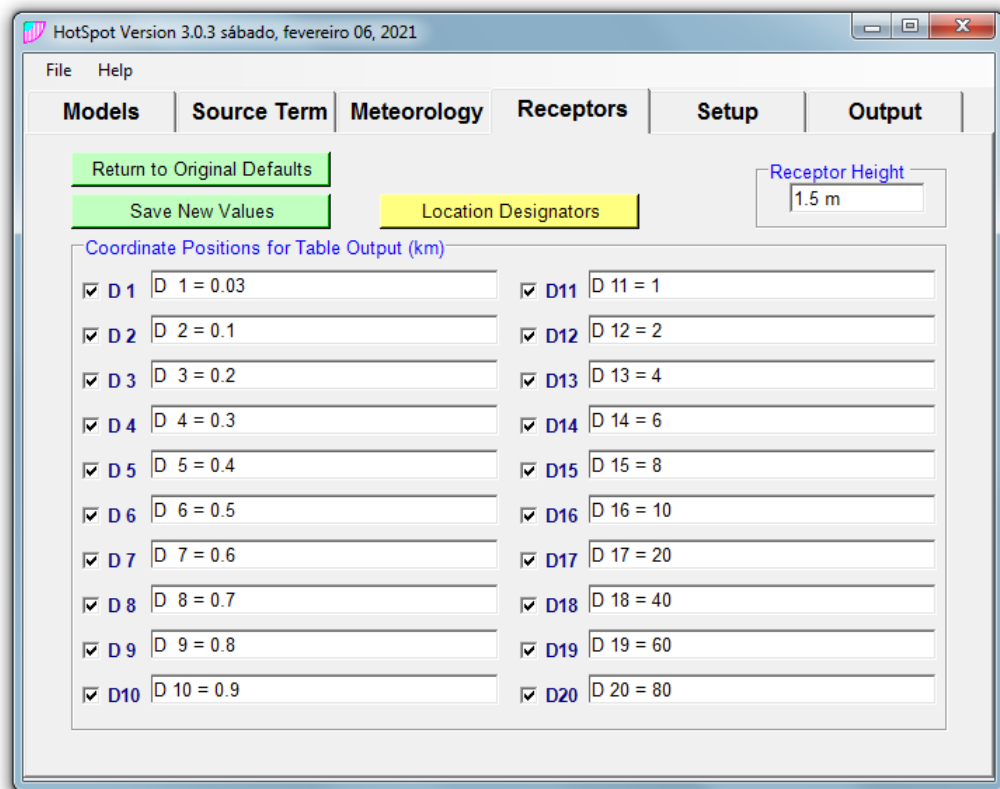


Figura 6: Tela do HotSpot para configurar a altura do receptor e as vinte posições em relação ao ponto de liberação da pluma.

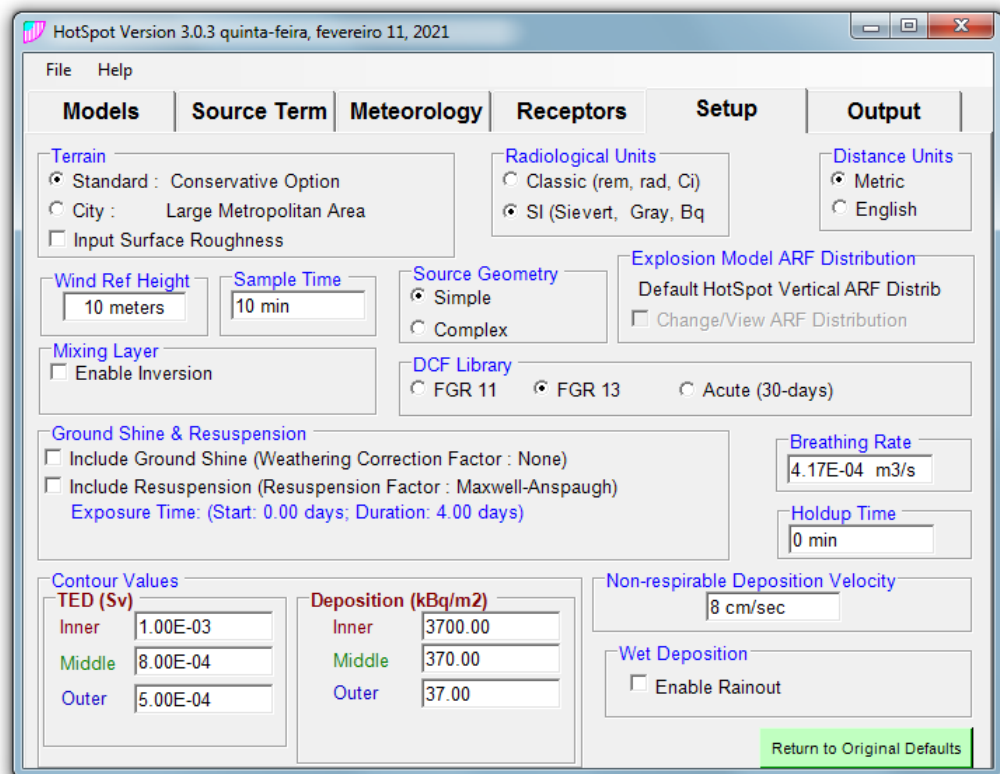


Figura 7: Tela do HotSpot para configurar vários parâmetros.

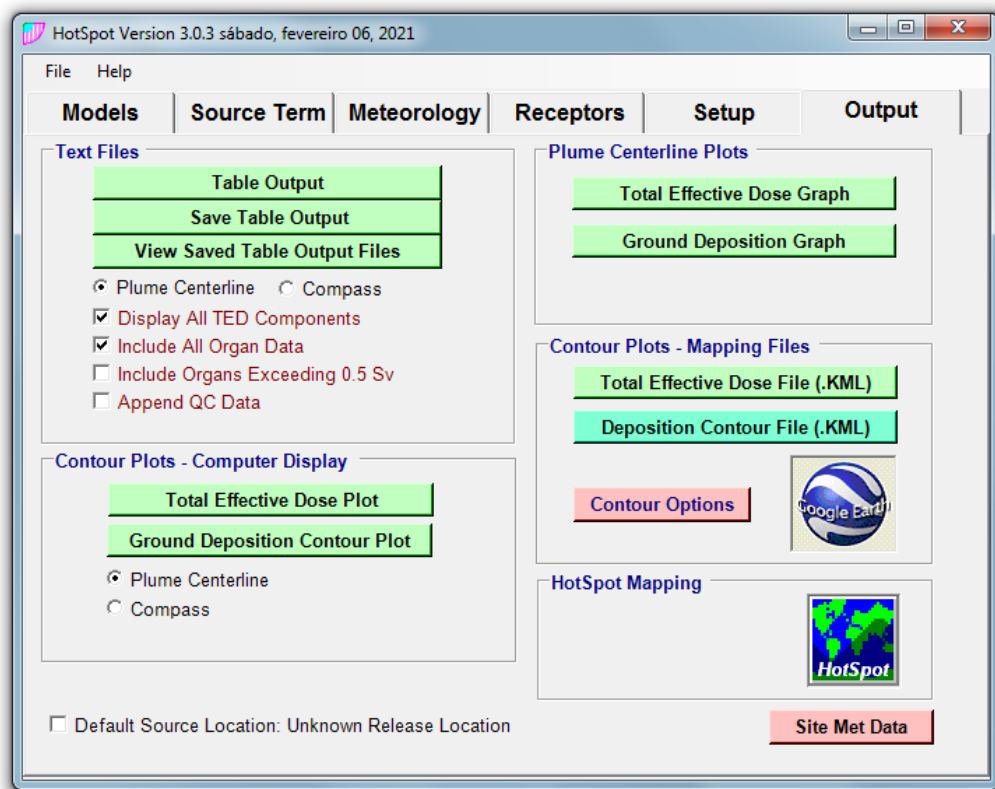


Figura 8: Tela do HotSpot para configurar os arquivos de tabelas e gráficos que são gerados na saída.

6. RESULTADOS

O software HotSpot gera diversos dados de saída, entre eles destacaremos a dose efetiva total em função da distância a partir do ponto de emissão da pluma, as curvas de isodoses que delimitam três regiões com diferentes intervalos das doses efetivas totais e as doses equivalentes comprometidas em função da distância do ponto de emissão da pluma para 23 órgãos e tecidos.

6.1. DOSE EFETIVA TOTAL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

Na Figura 9 são mostrados os gráficos da dose efetiva total em função da distância a partir do ponto de emissão da pluma para cada classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford e para cada velocidade do vento na altura de 10 m. Pode ser observado que para cada classe de estabilidade a dose efetiva total, conforme se afasta do ponto de emissão da pluma, aumenta rapidamente atingindo um máximo e depois vai diminuindo suavemente. Também pode ser observado que para um mesmo valor da velocidade do vento o comportamento da dose efetiva total é semelhante para cada classe de estabilidade, sendo que se verifica um deslocamento das curvas, se afastando do ponto de emissão da pluma conforme se passa da classe de estabilidade A até F. Tal comportamento pode ser explicado se levarmos em conta os valores do desvio padrão nas flutuações do vento na direção horizontal, σ_θ , que pela Tabela 1, são maiores na classe de estabilidade A (menos estável), 25 graus, e vão diminuindo conforme se passa até a classe de estabilidade F (mais estável), 2,5 graus, de modo que a dispersão da pluma fica mais concentrada próxima ao ponto de emissão para maiores valores de σ_θ e mais concentrada afastada do ponto de emissão para menores valores de σ_θ . Também é possível observar que os valores das doses efetivas totais são reduzidos gradualmente com o aumento da velocidade do vento em 10 m de altura. Esse comportamento talvez seja explicado pelo modelo gaussiano dado pela equação 11, com a concentração tendo em parte uma dependência inversamente proporcional à média da velocidade do vento. Além disso, em Gibbs (1969) é demonstrado que o crescimento da pluma pode ser inversamente proporcional à velocidade do vento e em Guldberg (1975) tal comportamento é verificado. Considerando os valores das doses efetivas totais máximas podemos verificar de forma mais detalhada essas variações consultando a Tabela 5 e a Figura 10. Com a velocidade do vento variando de 0,5 m/s até 6,0 m/s os valores

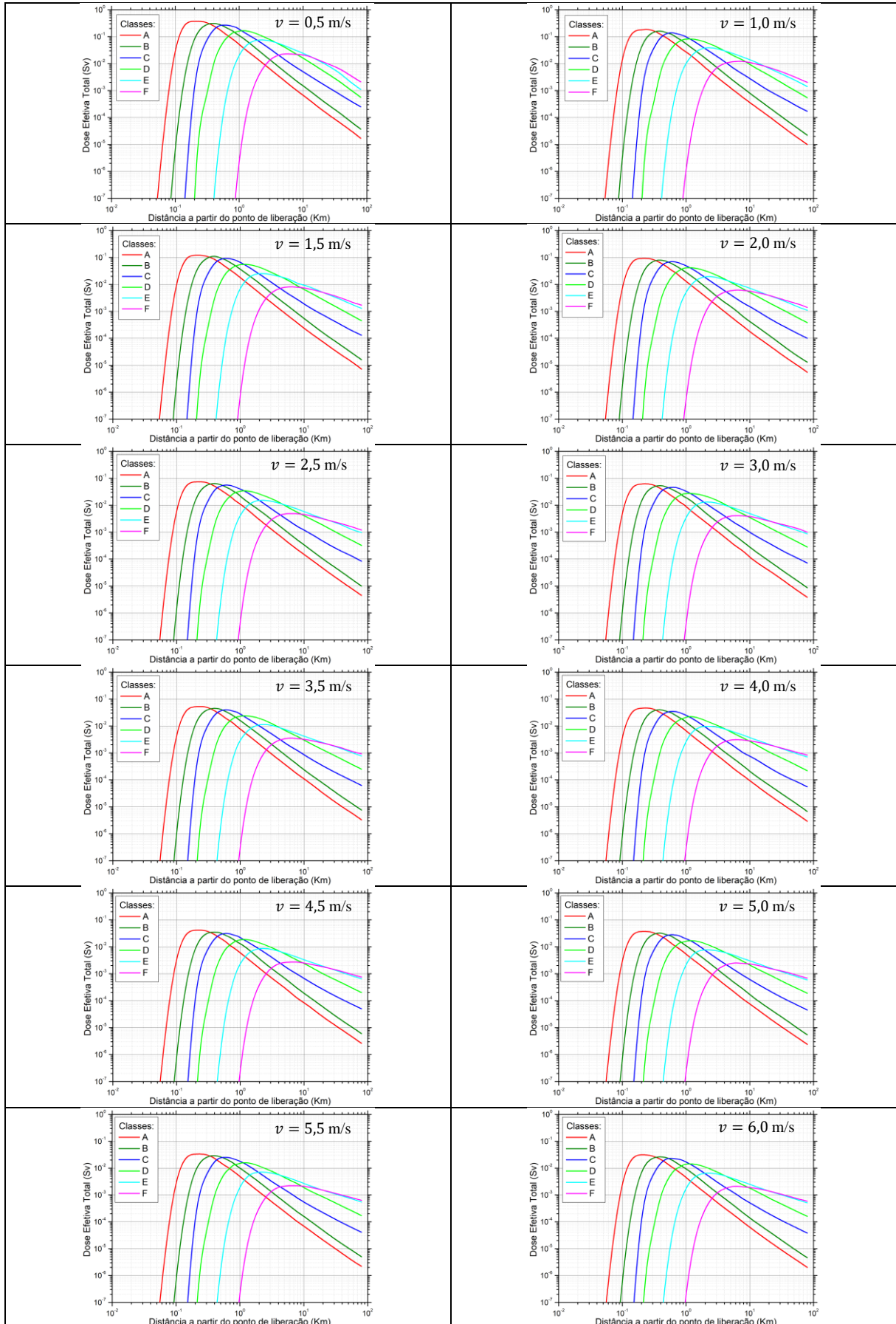


Figura 9 Variação da Dose Efetiva Total com a distância a partir do ponto de liberação, para cada velocidade.

iniciais máximos das doses são reduzidos por um fator de 12 aproximadamente. Na Tabela 5 é possível verificar que, para uma velocidade do vento em 10 m de altura igual a 0,5 m/s, as doses efetivas totais máximas para as classes de estabilidade A, B, C, D, E, e F, ocorrem, respectivamente nas distâncias de 0,23, 0,38, 0,60, 1,1, 2,3 e 6,1 km a partir do ponto de emissão da pluma. Já para uma velocidade do vento em 10 m de altura igual a 6,0 m/s, as respectivas distâncias são: 0,23, 0,39, 0,60, 1,2, 2,3 e 6,5 km. Os valores máximos da dose efetiva total ocorrem na classe de estabilidade A e sempre na distância de 0,23 km, para qualquer valor da velocidade. Também podemos observar que a maior dose ocorre para esta classe de estabilidade atmosférica com o menor valor para a velocidade do vento, 0,5 m/s. As distâncias não variam muito com a velocidade do vento quando se fixa a classe de estabilidade. Além dos parâmetros meteorológicos, a localização específica da dose máxima depende da altura efetiva de lançamento da pluma e da velocidade de deposição (razão entre o fluxo de deposição observado e a concentração do ar observada próxima à superfície do solo). Como nas simulações realizadas os valores para esses dois parâmetros não foram alterados, a distância da dose máxima não variou muito com a velocidade do vento, mas varia quando se passa de uma classe de estabilidade atmosférica para outra.

Tabela 5: Variação da Dose Efetiva Total Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Efetiva Total Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,381(0,23)	0,315(0,38)	0,274(0,6)	0,164(1,1)	0,076(2,3)	0,023(6,1)
1,0	0,191(0,23)	0,158(0,38)	0,138(0,6)	0,083(1,1)	0,039(2,3)	0,012(6,3)
1,5	0,128(0,23)	0,106(0,39)	0,092(0,6)	0,056(1,2)	0,026(2,3)	0,00812(6,4)
2,0	0,096(0,23)	0,08(0,39)	0,069(0,6)	0,042(1,2)	0,019(2,3)	0,00613(6,4)
2,5	0,077(0,23)	0,064(0,39)	0,056(0,6)	0,034(1,2)	0,016(2,3)	0,00492(6,4)
3,0	0,064(0,23)	0,053(0,39)	0,046(0,6)	0,028(1,2)	0,013(2,3)	0,00411(6,4)
3,5	0,055(0,23)	0,045(0,39)	0,04(0,6)	0,024(1,2)	0,011(2,3)	0,00353(6,4)
4,0	0,048(0,23)	0,04(0,39)	0,035(0,6)	0,021(1,2)	0,00979(2,3)	0,0031(6,5)
4,5	0,043(0,23)	0,035(0,39)	0,031(0,6)	0,019(1,2)	0,0087(2,3)	0,00276(6,5)
5,0	0,038(0,23)	0,032(0,39)	0,028(0,6)	0,017(1,2)	0,00784(2,3)	0,00248(6,5)
5,5	0,035(0,23)	0,029(0,39)	0,025(0,6)	0,015(1,2)	0,00713(2,3)	0,00226(6,5)
6,0	0,032(0,23)	0,027(0,39)	0,023(0,6)	0,014(1,2)	0,00654(2,3)	0,00207(6,5)

Os valores entre parênteses indicam a distância em que ocorre a Dose Efetiva Total Máxima.

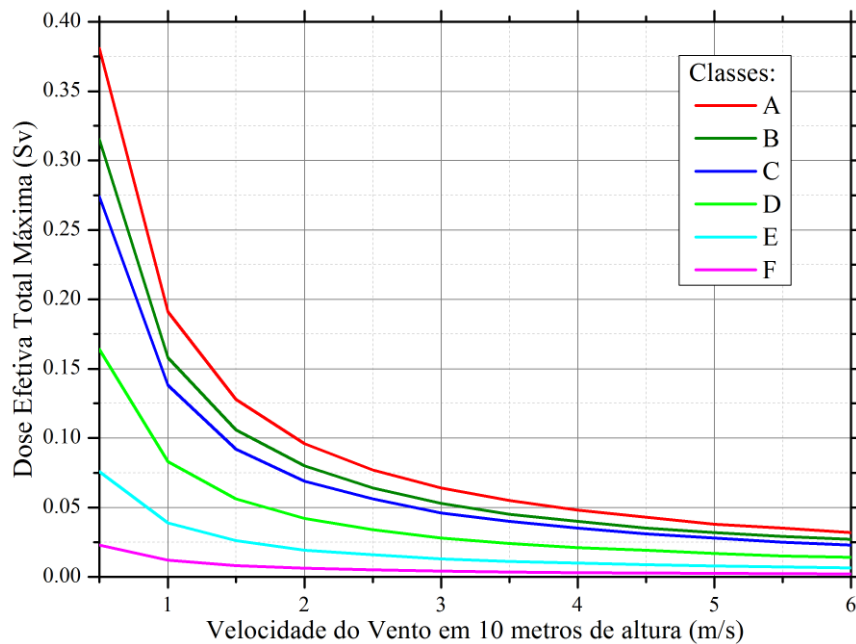


Figura 10: Variação da Dose Efetiva Total Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

6.2. CURVAS DE ISODOSES

As simulações também resultaram em três curvas de isodoses em função da distância a partir da emissão da pluma, para as seis classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford e para cada um dos valores da velocidade do vento em 10 m de altura. No Apêndice A são mostradas todas as isodoses por classe de estabilidade atmosférica e para cada valor da velocidade do vento: nas Figuras de 17 até 22 são apresentados os gráficos das três curvas de isodoses rotuladas como interna (vermelha), mediana (verde) e externa (azul marinho) que estão associadas, respectivamente, aos valores de 1 mSv, 0,8 mSv e 0,5 mSv de dose. A dose de 1 mSv corresponde ao limite anual para o público, conforme recomendado por ICRP 103, 2007 e CNEN, 2014. Na Tabela 6 são listadas as áreas delimitadas por essas isodoses correspondentes a simulação. Considerando os isodoses para uma mesma classe de estabilidade atmosférica, podemos verificar que as áreas diminuem com o aumento da velocidade do vento, exceto para as classes E e F e na velocidade 1,0 m/s que têm áreas maiores quando comparadas com o caso da velocidade de 0,5 m/s. Também podemos verificar que fixando a velocidade observamos

que as áreas das isodotes aumentam quando se passa de uma classe de estabilidade para outra vizinha na ordem de A até a F e isso ocorre praticamente em todos os valores da velocidade. No entanto, isso não se observa para a classe de estabilidade F nos valores de 1,5 m/s até 6,0 m/s da velocidade, cujas áreas são menores com relação a classe de estabilidade E.

Considerando todas as combinações de classes de estabilidade com as velocidades do vento, podemos constatar que as três menores áreas internas, 1,2 km², 1,3 km² e 1,5 km², ocorrem na classe de estabilidade A, nas respectivas velocidades 5,0 m/s, 5,5 m/s e 6,0 m/s e as três maiores áreas internas, 258 km², 253 km² e 265 km², ocorrem, respectivamente, na classe de estabilidade E e velocidade igual à 1,0 m/s e na classe de estabilidade F com velocidades iguais à 0,5 m/s e 1,0 m/s.

Tabela 6: Variação da Área da Isodose com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Área da Isodose (Km ²)																	
	A			B			C			D			E			F		
	Int.	Med.	Ext.	Int.	Med.	Ext.	Int.	Med.	Ext.	Int.	Med.	Ext.	Int.	Med.	Ext.	Int.	Med.	Ext.
0,5	14,0	18,0	29,0	23,0	29,0	46,0	67,0	87,0	151,0	157,0	195,0	304,0	221,0	270,0	387,0	253,0	299,0	415,0
1,0	7,5	9,4	15,0	12,0	16,0	25,0	34,0	45,0	83,0	119,0	155,0	268,0	258,0	328,0	510,0	265,0	338,0	548,0
1,5	5,0	6,3	10,0	8,4	11,0	17,0	22,0	29,0	53,0	86,0	114,0	206,0	224,0	304,0	525,0	223,0	304,0	558,0
2,0	3,8	4,7	7,7	6,3	7,9	13,0	16,0	21,0	38,0	64,0	86,0	160,0	178,0	258,0	490,0	174,0	251,0	511,0
2,5	3,0	3,8	6,1	5,0	6,3	10,0	12,0	16,0	29,0	49,0	67,0	127,0	138,0	209,0	437,0	130,0	200,0	443,0
3,0	2,5	3,1	5,1	4,2	5,3	8,6	9,6	13,0	23,0	39,0	54,0	104,0	107,0	166,0	379,0	95,0	156,0	375,0
3,5	2,1	2,7	4,4	3,6	4,5	7,3	7,9	10,0	19,0	32,0	44,0	86,0	83,0	132,0	324,0	70,0	120,0	313,0
4,0	1,9	2,3	3,8	3,1	3,9	6,4	6,8	8,9	16,0	27,0	37,0	73,0	66,0	106,0	275,0	52,0	91,0	259,0
4,5	1,6	2,1	3,4	2,8	3,5	5,7	5,9	7,7	14,0	23,0	31,0	32,0	53,0	85,0	233,0	39,0	70,0	215,0
5,0	1,5	1,9	3,0	2,5	3,1	5,1	5,1	6,8	12,0	19,0	27,0	54,0	43,0	70,0	197,0	30,0	55,0	178,0
5,5	1,3	1,7	2,8	2,2	2,8	4,6	4,6	6,0	11,0	17,0	24,0	48,0	35,0	58,0	166,0	23,0	43,0	148,0
6,0	1,2	1,5	2,5	2,0	2,6	4,2	4,1	5,4	9,8	15,0	21,0	42,0	30,0	49,0	140,0	18,0	35,0	123,0

6.3. DOSES EQUIVALENTES COMPROMETIDAS

O Software HotSpot calcula a dose equivalente comprometida considerando o correspondente fator de ponderação da radiação, w_R , de cada órgão ou tecido e um tempo de integração $\tau = 50$ anos na Equação 8. O HotSpot calcula as doses equivalentes comprometidas para os seguintes 23 órgãos e tecidos: tireoide, pulmão, esôfago, parede do intestino grosso inferior (PIGI), superfície dos ossos, parede do intestino grosso superior (PIGS), medula óssea vermelha (MOV), fígado, parede da bexiga, parede do intestino delgado (PID), parede do estômago, ovários, pele, timo, glândulas adrenais, pâncreas, baço, útero, rins, mamas, músculos, cérebro e testículos. Os resultados são mostrados nos gráficos das Figuras 17 até 45 e nas Tabelas 6 até 28. Nas Figuras 11 até 16 são mostradas as variações da dose equivalente comprometida com a distância a partir do ponto de liberação da pluma, considerando cada uma das classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford. Os gráficos (a) e (b) são para o caso da velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s e (c) e (d) são para o caso da velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s, (a) e (c) para todos os órgãos e (b) e (d) sem a tireoide e os pulmões para se ter uma melhor escala de visualização. Podemos observar que as doses equivalentes comprometidas vão diminuindo conforme se passa da classe de estabilidade A até a F. Tal comportamento já era esperado, pois as doses efetivas totais, que são proporcionais às doses equivalentes comprometidas, apresentam esse comportamento em função das classes de estabilidade. No Apêndice B são apresentados os resultados para cada órgão e tecido: nas tabelas 7 até 29 e seus respectivos gráficos nas Figuras 23 até 45, podemos verificar a variação das doses equivalentes comprometidas máximas em função da velocidade do vento em 10 m, para cada órgão e tecido considerando cada uma das classes de estabilidade. Quando a velocidade do vento varia de 0,5 m/s até 6,0 m/s os valores iniciais máximos das doses equivalentes comprometidas são reduzidos por um fator de 12 aproximadamente, assim como ocorre com as doses efetivas totais máximas. Também podemos observar que a maior dose equivalente comprometida ocorre para a classe de estabilidade atmosférica A com a menor velocidade do vento, 0,5 m/s.

Independente da classe de estabilidade e da velocidade do vento, os órgãos que apresentam os maiores valores da dose equivalente comprometida são a tireoide, pulmão, esôfago e parede do intestino grosso inferior. Os valores máximos da dose equivalente comprometida para cada um dos órgãos ocorrem na classe de estabilidade A e na distância de 0,23 km e para qualquer valor

da velocidade do vento. Esse resultado é esperado, pois as doses efetivas totais apresentam esse comportamento. No entanto, na configuração dos dados de entrada do HotSpot, foi utilizada a configuração básica e na tela de entrada apresentada na Figura 7 não foi considerada a opção de emissão do solo e ressuspensão. Caso fosse habilitada essa opção, provavelmente os órgãos com os maiores valores da dose equivalente comprometida seriam outros. A pele, por exemplo, teria uma dose mais alta do que a encontrada na presente simulação.

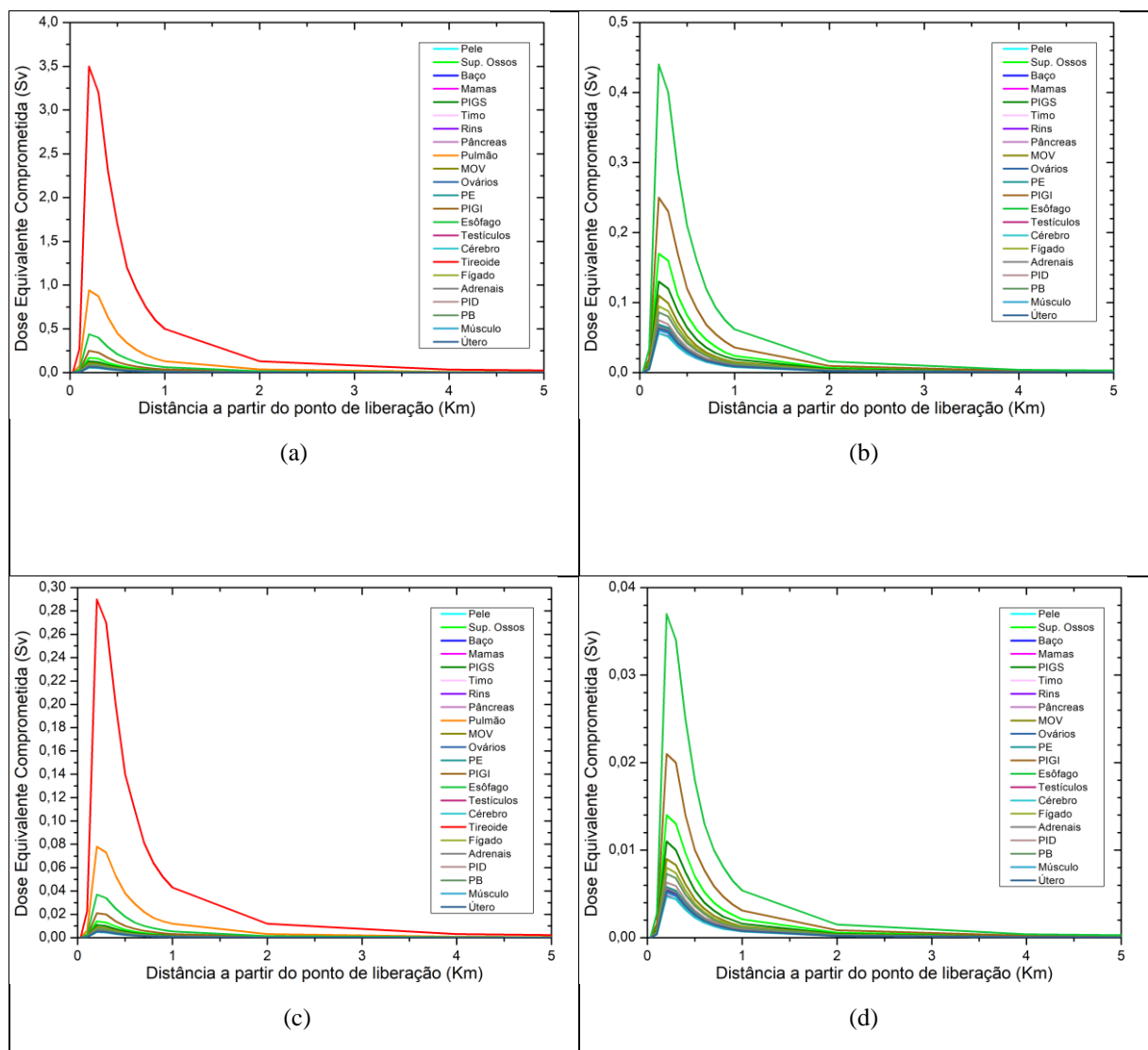


Figura 11: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade A. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.

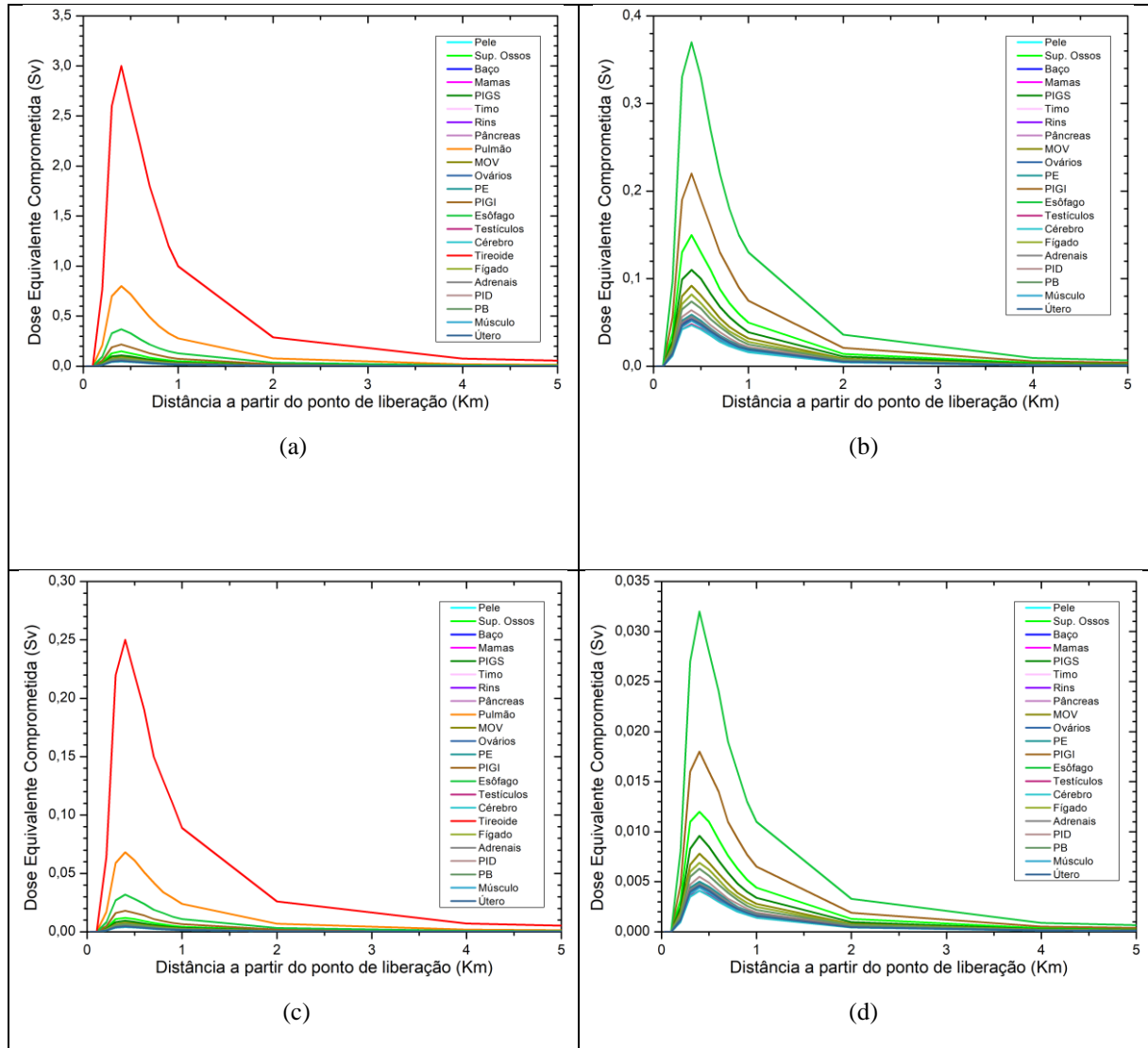


Figura 12: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade B. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.

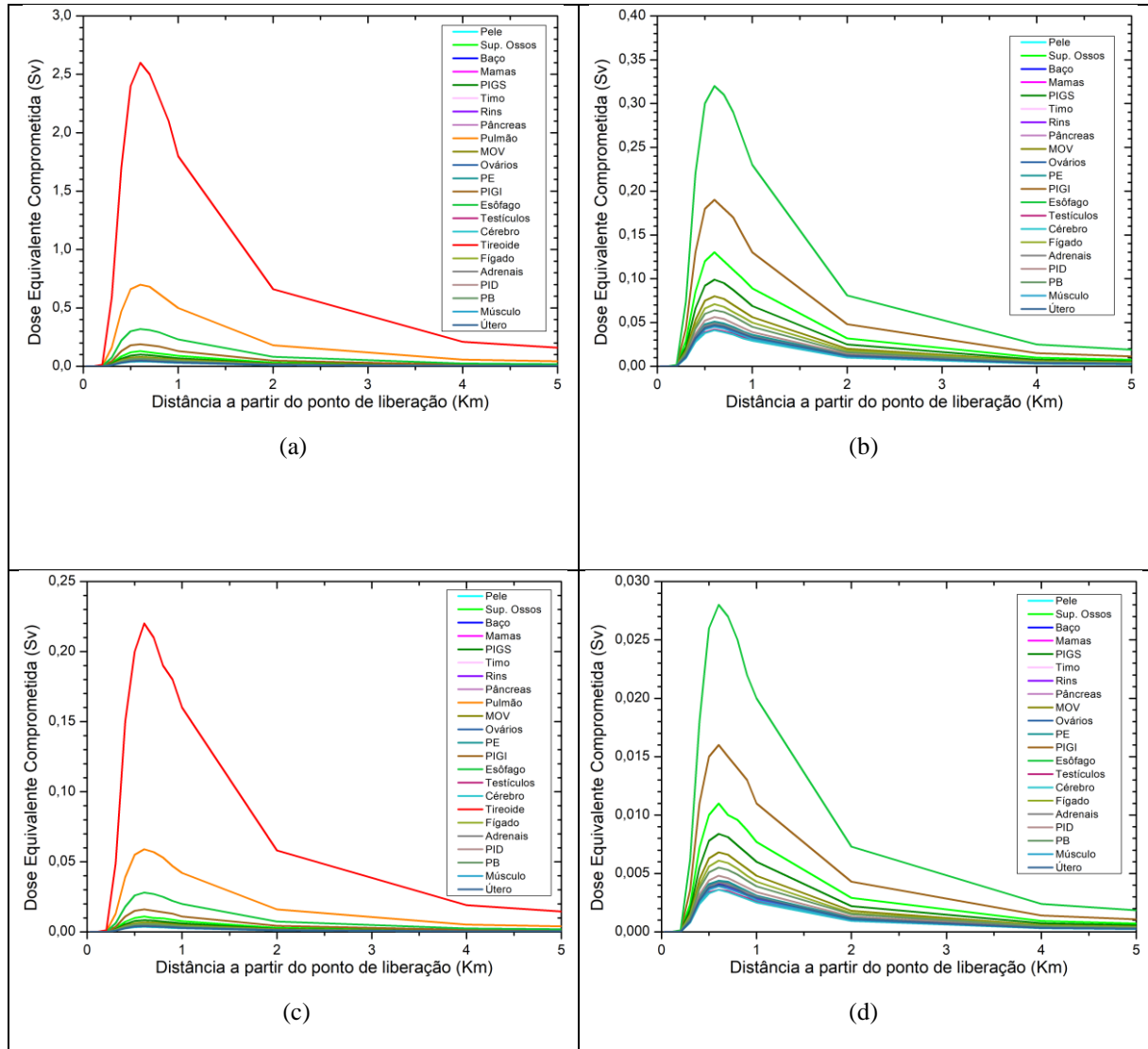


Figura 13: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade C. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.

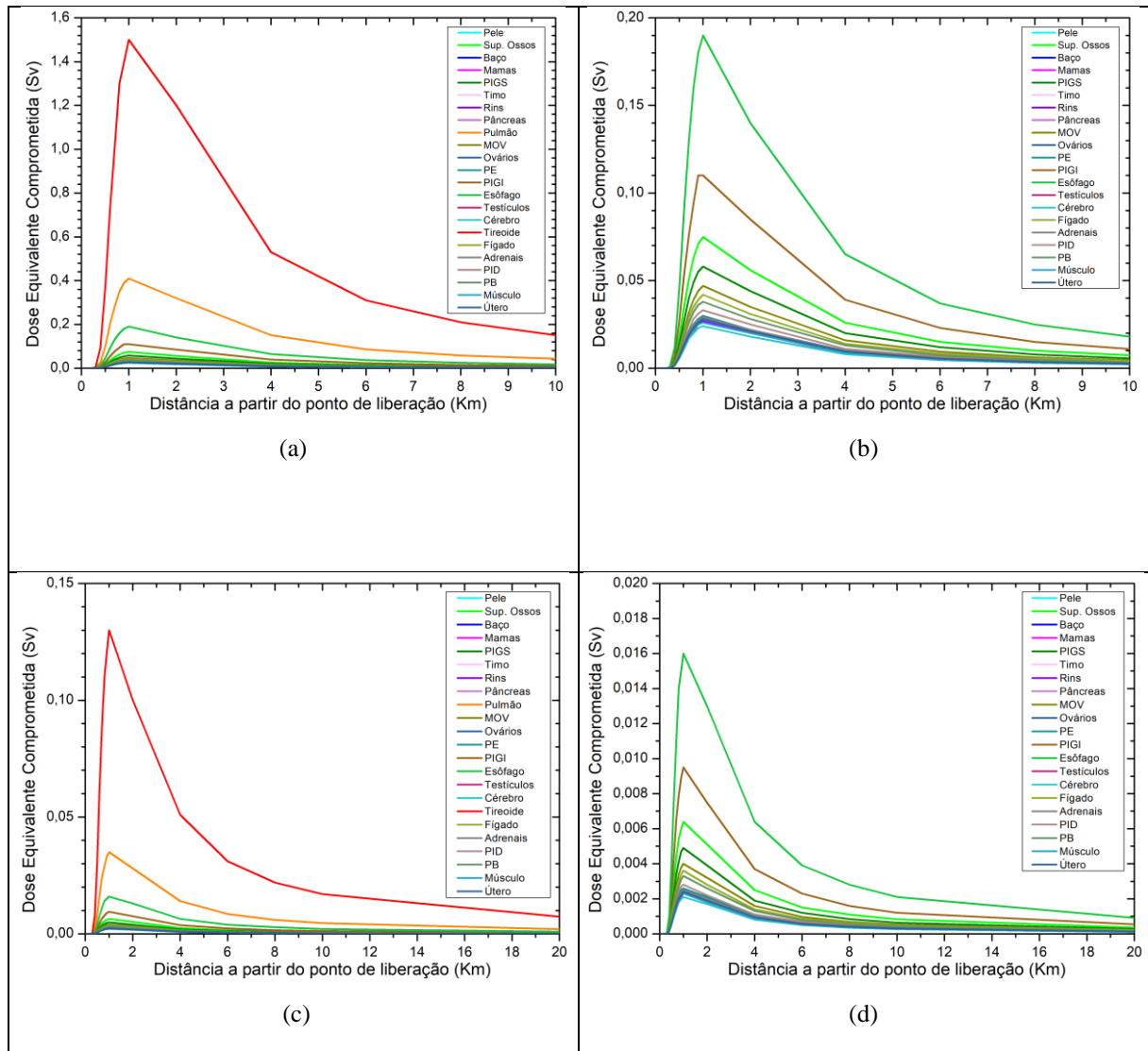


Figura 14: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade D. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.

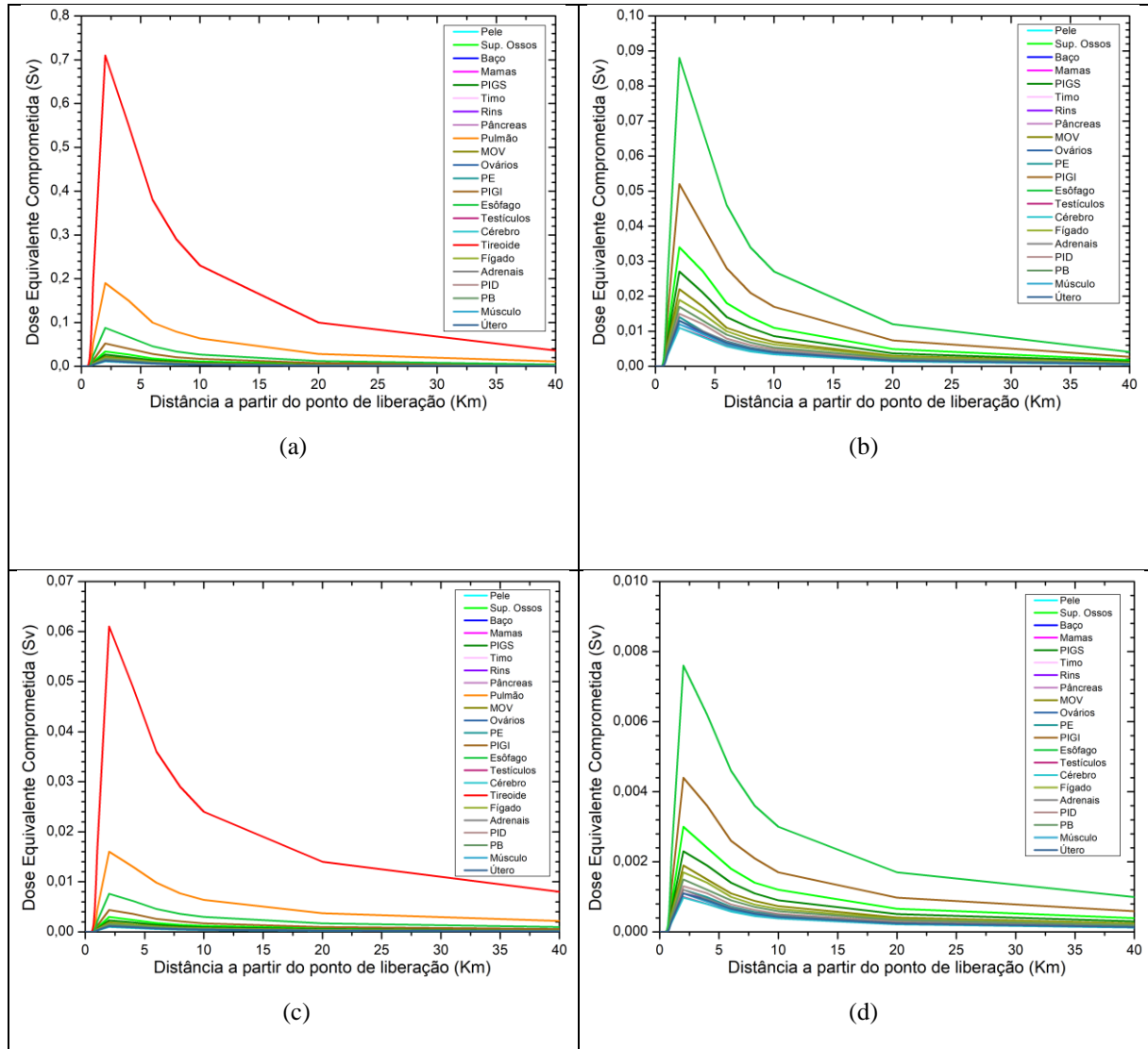


Figura 15: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade E. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.

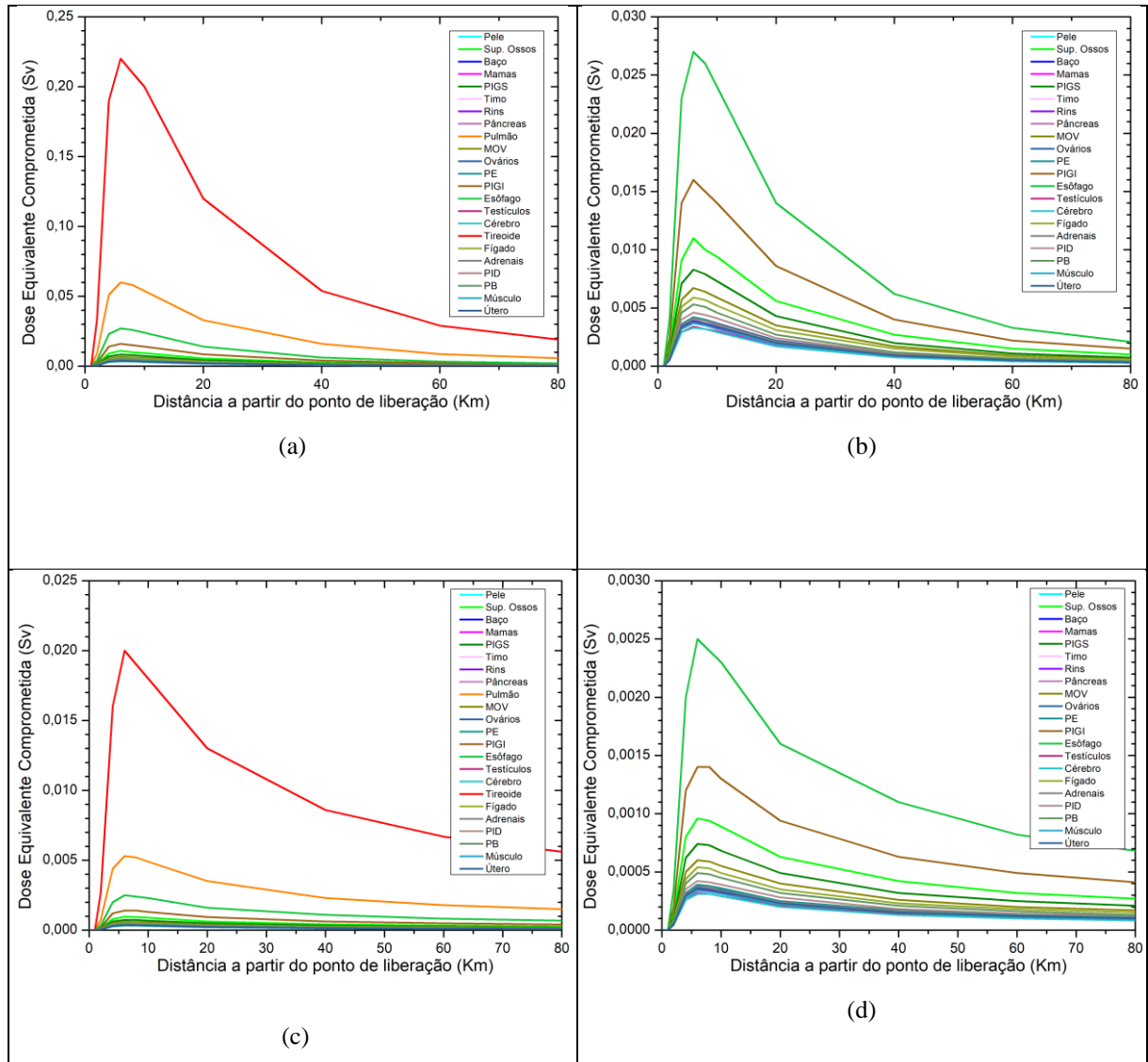


Figura 16: Variação da Dose Equivalente Comprometida com a distância a partir do ponto de liberação, considerando a classe de estabilidade F. Velocidade do vento em 10 m igual a 0,5 m/s: (a) Todos os órgãos; (b) Exceto a tireoide e os pulmões; Velocidade do vento em 10 m igual a 6,0 m/s: (c) Todos os órgãos; (d) Exceto a tireoide e os pulmões.

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estimado o impacto radiológico de um acidente de base de projeto considerando um cenário de LOCA em um reator PWR genérico. Foi considerado que o termo de fonte gerado pelo LOCA passou por diversas barreiras de contenção até ser liberado para a atmosfera. O inventário e a atividade dos radionuclídeos contidos no termo de fonte foram fornecidos por trabalhos anteriores. Para analisar a pluma radioativa liberada foi utilizado o software HotSpot, cujo algoritmo é baseado modelo de dispersão atmosférica gaussiano, para estimar os valores das doses levando em conta seis classes de estabilidade de Pasquill-Gifford, de A até F, e a variação da velocidade do vento na altura de referência de 10 metros, variando de 0,5 m/s até 6,0 m/s, com intervalos de 0,5 m/s, totalizando 12 valores para cada classe de estabilidade.

Observou-se que a variação da dose efetiva total em função da distância a partir do ponto de emissão da pluma, Figura 9, para um mesmo valor da velocidade do vento o comportamento da dose efetiva total é semelhante para cada classe de estabilização, sendo que se verifica um deslocamento das curvas, se afastando do ponto de emissão da pluma conforme se passa da classe de estabilização A até F. Há também semelhança no comportamento da dose efetiva total quando se considera uma determinada classe de estabilidade em cada um dos valores da velocidade do vento, sendo que é observado que os valores das doses efetivas totais são reduzidos gradualmente com o aumento da velocidade do vento. Particularmente, os valores iniciais máximos das doses são reduzidos por um fator de 12 aproximadamente, quando se varia a velocidade do vento de 0,5 m/s até 6,0 m/s (Figura 10 e Tabela 5). Também se concluiu que os valores máximos da dose efetiva total ocorrem na classe de estabilidade A e sempre na distância de 0,23 km do ponto de emissão da pluma, para qualquer valor da velocidade.

Com relação aos gráficos das isodoses, Figuras 17 até 22, foi concluído que, para uma mesma classe de estabilidade atmosférica, as áreas delimitadas pelas isodoses diminuem com o aumento da velocidade do vento, com exceção das classes E e F e na velocidade 1,0 m/s que têm áreas maiores quando comparadas com o caso da velocidade de 0,5 m/s. Também foi observado que fixando a velocidade as áreas das isodoses aumentam quando se passa de uma classe de estabilidade para outra vizinha na ordem de A até a F e isso ocorreu praticamente em todos os valores da velocidade, com exceção para a classe

de estabilidade F nos valores de 1,5 m/s até 6,0 m/s da velocidade, cujas áreas são menores com relação a classe de estabilidade E.

Com relação as estimativas da dose equivalente comprometida dos 23 órgãos e tecidos concluímos que o comportamento dessa grandeza seguiu o mesmo comportamento apresentado pela dose efetiva total, resultado que já era esperado. Foi observado que as doses equivalentes comprometidas vão diminuindo conforme se passa da classe de estabilidade A até a F. Observou-se também que quando a velocidade do vento varia de 0,5 m/s até 6,0 m/s os valores iniciais máximos das doses equivalentes comprometidas são reduzidos por um fator de 12 aproximadamente, assim como ocorreu com as doses efetivas totais máximas. Também foi constatado que as maiores doses equivalente comprometidas ocorreram na tireoide, pulmão, esôfago e parede do intestino grosso inferior, independentemente da classe de estabilidade e da velocidade do vento, além disso, os valores máximos da dose equivalente comprometida para cada um dos órgãos ocorreram na classe de estabilidade A e na distância de 0,23 km e para qualquer valor da velocidade do vento.

7.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas simulações realizadas nesta dissertação sugerimos a implementação de alguma metodologia de análise de sensibilidade, bem como a realização de análise de incertezas associadas.

Também para trabalhos futuros sugerimos novas simulações com alterações no cenário da simulação, por exemplo, modificações no grau de irregularidades do terreno padrão ou considerar o terreno tipo cidade. Adicionalmente seria possível considerar a emissão do solo e a ressuspensão e os diversos ajustes disponíveis para ambos, tais como o tempo de exposição e fatores de correções. Outras opções que poderiam ser avaliadas seriam a camada de inversão e a deposição úmida. A sugerida análise de sensibilidade também poderia ser implementada nas novas simulações. Estudos mais detalhados sobre como a dose equivalente comprometida se comporta poderiam ser elaborados, procurando estabelecer quais órgãos e tecidos apresentam as maiores doses com relação não só a atual simulação, como também nas possíveis simulações sugeridas.

REFERÊNCIAS

American Nuclear Society (ANS), About Nuclear: Effects of Radiation, <https://www.ans.org/nuclear/radiation/effects/>. Acesso em: 30 de mar. de 2021.

BRIGGS, G.A., Plume Rise, **U.S. Atomic Energy Commission Critical Review Series**, prepared for Nuclear Safety Information Center, Oak Ridge National Laboratory, reprinted by the National Technical Information Service, Springfield, Va., 1969.

BULHOSA, VALQUIRIA MIRANDA. **Risco de Desenvolvimento de Câncer Sólido e sua Relação com as Classes de Estabilidade Atmosférica de Pasquill-Gifford em Cenários RDD**. Dissertação (Mestrado em Ciência de Tecnologia Nucleares), Instituto de Engenharia Nuclear, CNEN, 2018.

CAO, B., ZHENG, J., CHEN, Y., Radiation Dose Calculations for a Hypothetical Accident in Xianning Nuclear Power Plant, **Science and Technology of Nuclear Installations**, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 3105878, 6 pages, Vol. 2016.

CAO, B., CUI, W., RASHEED, I., CHEN, Y., Atmospheric dispersion modelling and radiological safety analysis for a hypothetical accident of liquid-fuel thorium molten salt reactor (TMSR-LF), **Bulgarian Chemical Communications**, Vol. 50, Special Issue G (pp. 78-85), 2018.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Norma CNEN-NN-3.01:2011. Rio de Janeiro: CNEN. Março de 2014.

COSTA, KAROLINA PEREIRA DA SILVA. **Risco de Incidência de Câncer de Pulmão por Exposição Radiológica em Cenários RDD**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares), Instituto de Engenharia Nuclear, CNEN, 2018.

DOMINGOS, ÉRICA NASCIMENTO. **Simulação de Incêndio em Depósito de Rejeitos Radioativos e o Risco Radiológico Associado a esse Cenário**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares), Instituto de Engenharia Nuclear, CNEN, 2018.

DUDERSSTAD, J.J. HAMILTON L.J., **Nuclear Reactor Analyses**, John Wiley & Sons Inc., New York, United States of America (1976).

ECKERMAN, K. F., WOLBARST, A. B., RICHARDSON, A. C. B. **Federal Guidance Report No. 11: Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose**

Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion. EPA -520/1-88-020. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs; 1988.

ECKERMAN, K. F., RYMAN, J. C. **Federal Guidance Report No. 12: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil.** EPA-402-R-93-081. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; Office of Radiation and Indoor Air; 1993.

ECKERMAN, K. F., LEGGETT, R. W., NELSON, C. B., PUSKIN, J. S., RICHARDSON, A. C. B. **Federal Guidance Report No. 13: Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides.** EPA-402-R-99-001. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; Office of Radiation and Indoor Air; September 1999.

EPA (2000). Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications, EPA 454/R-99-005, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, February 2000.

GIFFORD, F. A. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion, **Nuclear Safety**, 4(2), p. 91-92, 1961.

GULDBERG, P. H., A Comparison of Plume Rise Formulas Applied to Tall Stack Data, **Journal Applied Meteorology**, 14., 1975.

GYAMFI, K., BIRIKORANG, S. A., AMPOMAH-AMOAKO, E., FLETCHER, J. J., Radiological Safety Analysis for a Hypothetical Accident of a Generic VVER-1000 Nuclear Power Plant, **Science and Technology of Nuclear Installations**, Article ID 4721971, 8 pages, 2020a.

GYAMFI, K., BIRIKORANG, S.A., AMPOMAH-AMOAKO, E., FLETCHER, J.J., *Radiological risk assessment of a proposed site for a generic VVER-1000 using HotSpot and InterRas codes*, **Progress in Nuclear Energy**, 120 (2020b) 103239.

HAUGEN, D.A. (Editor): Project Prairie Grass, A Field Program In Diffusion, **Geophysical Research Papers**, No. 59, Vol III, AFCRC-TR-58-235(III), Air Force Cambridge Research Center, 686 pp, 1959.

HOMANN SG. HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. **Lawrence Livermore National Laboratory**, CA, USA, 2014.

IAEA, **Atmospheric Dispersion Models for Application in Relation to Radionuclide Releases**, TEC-DOC 379, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1986.

IAEA, **IAEA Safety Glossary**, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2018 Edition, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2019.

IAEA, **Nuclear Power Reactors in the World**, 2020 Edition, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2020.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, ICRP Publication 60. Annals of the ICRP. P. Press. New York, N.Y., 1991.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection**. ICRP Publication 66. Annals of the ICRP, 1994.

ICRP, International Commission on Radiological Protection. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, “ICRP publication 103,” in Annals of the ICRP, vol.37, ICRP, Ottawa, Ontario, Canada, 2007.

JOYCE, M., **Nuclear Engineering: A Conceptual Introduction to Nuclear Power**, Elsevier - Butterworth-Heinemann, Amsterdã, 2018.

PASQUILL F. **The estimation of dispersion of windborne material**. Meteorological Magazine, 1961; 90:33–49.

PETRANGELI, G., **Nuclear Safety**, Elsevier - Butterworth-Heinemann, Amsterdã, 2006.

REVENTOS, F., **Thermal-Hydraulics of Water Cooled Nuclear Reactors**, Capítulo 3, Elsevier, 2017.

STACEY, W. M., **Nuclear Reactor Physics**, 2ª Edição, Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

SHAAT, M. K., ABDELHADY, A., MAHMOUD, R. F., Radiological Impact due to Atmospheric Releases of the Source Term for F-D, Unit 1, Using HOTSPOT Code, **Annals of Ecology and Environmental Science**, Volume 3, Issue 1, pp 33-39, 2019.

TABADAR Z., AGHAJANPOUR, S., JABBARI M., KHALEGHI, M., Hashemi-Tilehnoee M., *Thermal-hydraulic analysis of VVER-1000 residual heat removal system using RELAP5 code, an evaluation at the boundary of reactor repair mode*, Alexandria Engineering Journal (2018), **57**, 1249 - 1259.

TAUHATA, L; SALATI, I.P.A.; PRINZIO, R.D.; PRINZIO, A.R.D. **Radioproteção e Dosimetria - Fundamentos. Instituto de Radioproteção e Dosimetria.** Comissão Nacional de Energia Nuclear. 10ª revisão. 373 p. Rio de Janeiro: Abril de 2014.

THOMAN, D. C., BROTHERTON, K. M. e DAVIS, W., Benchmarking Upgraded HotSpot Dose Calculations Against MACCS2 Results, Washington Safety Management Solutions LLC, 2009.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. U. S. NRC. (2014). Disponível em: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/total-effective-dose-equivalent-tede.html>>. Acessado em: 20 de Out. de 2017.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. U. S. NRC. (2021). Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/design-basis-accident.html> Acesso em: 19 de fev. de 2021.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. U. S. NRC, Regulatory Guide 1.183 : Alternative Radiological Source Term for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors, Rockville, MD, USA, 2000.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Nuclear Radiation and Health Effects, <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx>. Acesso em: 30 de mar. de 2020.

YUNIARTO, ARIF., HIKMAT M. C. C., The Study of Atmospheric Dispersion Model on Accident Scenario of Research Reactor G. A. Siwabessy using HotSpot Codes as A Nuclear Emergency Decision Support System, **Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir**, Tri Dasa Mega Vol. 21 No. 1, 1-8, 2019.

APÊNDICE A: CURVAS DE ISODOSES

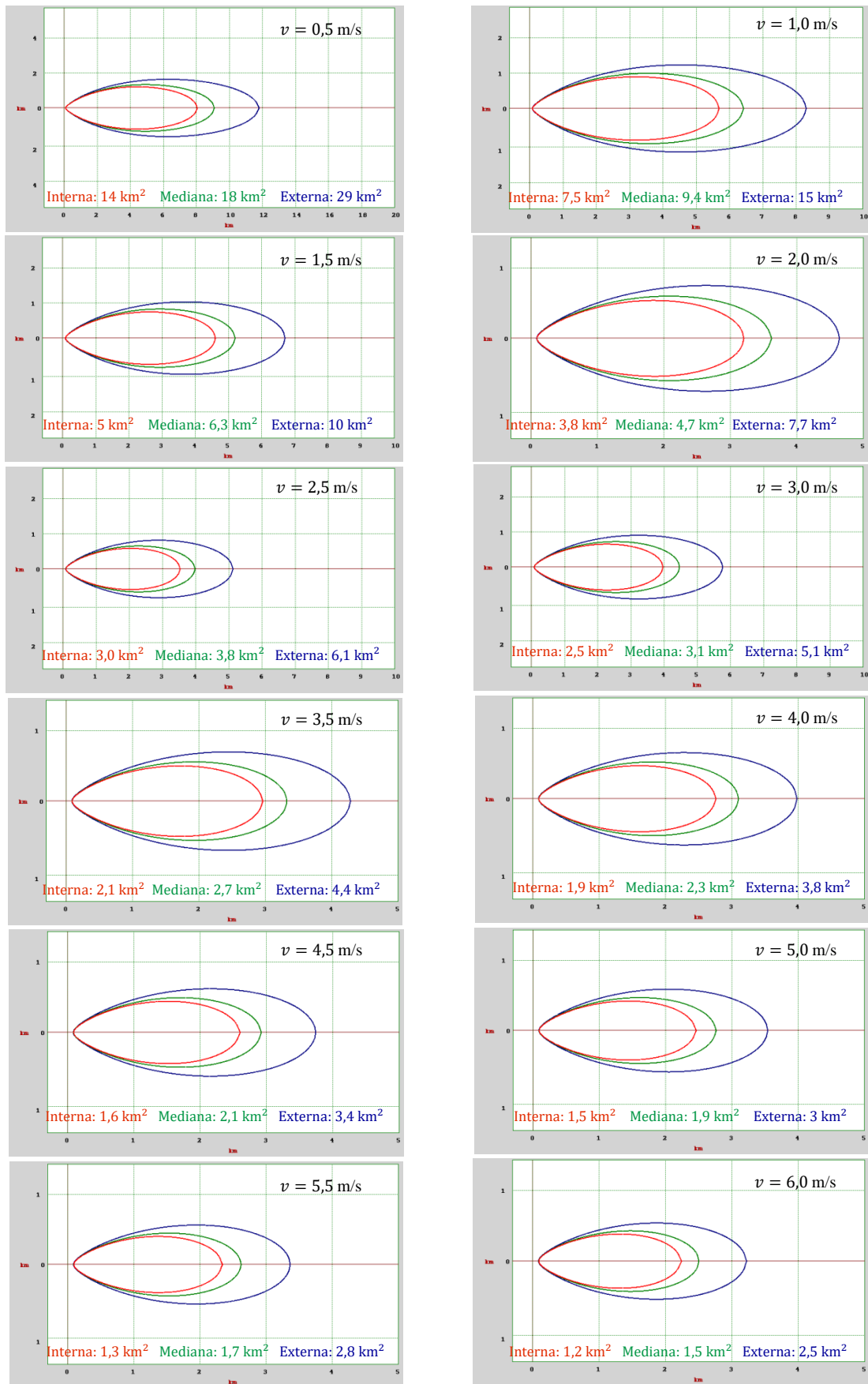


Figura 17: Classe de estabilidade A, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.

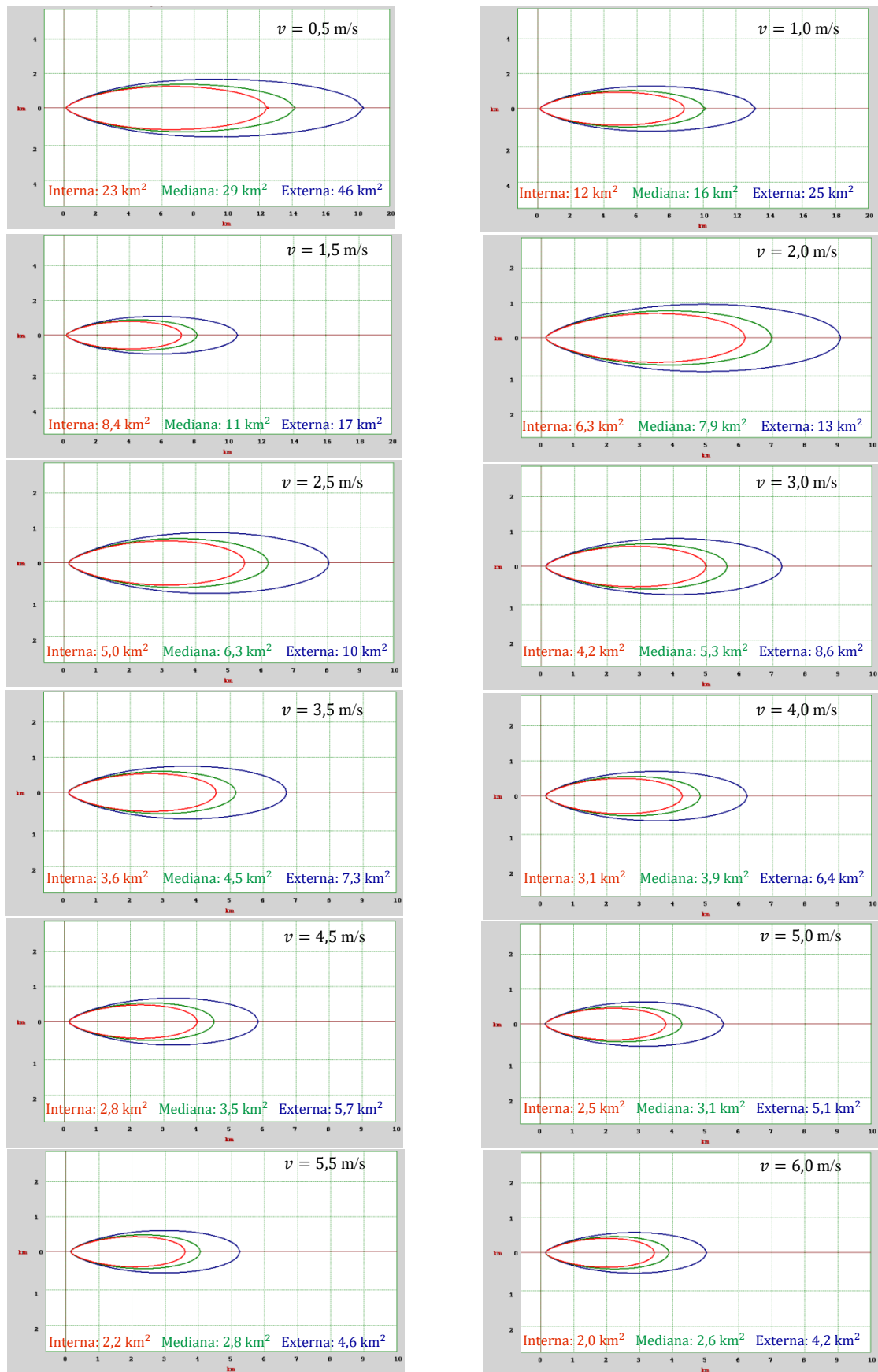


Figura 18: Classe de estabilidade B, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.

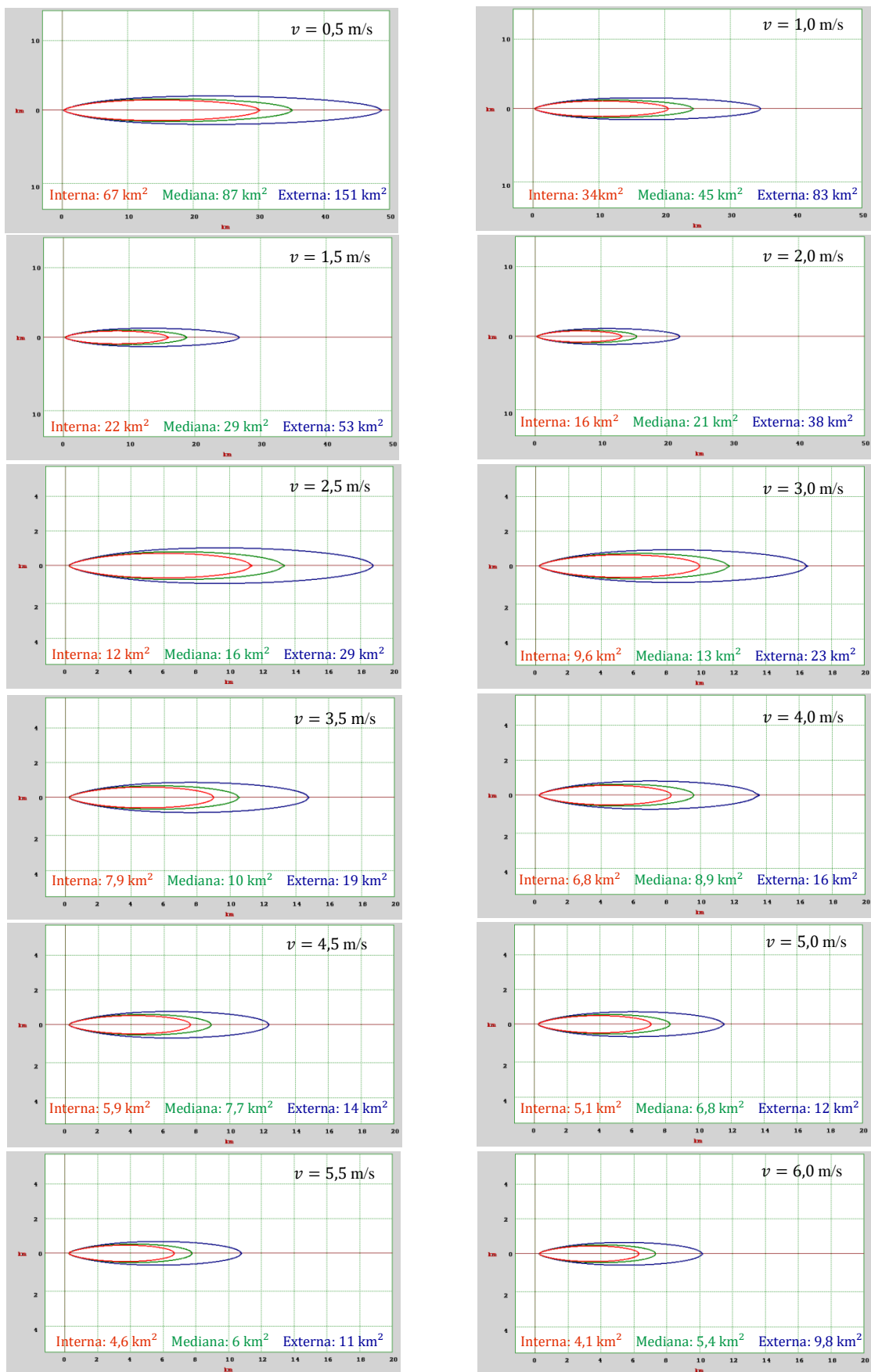


Figura 19: Classe de estabilidade C, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.

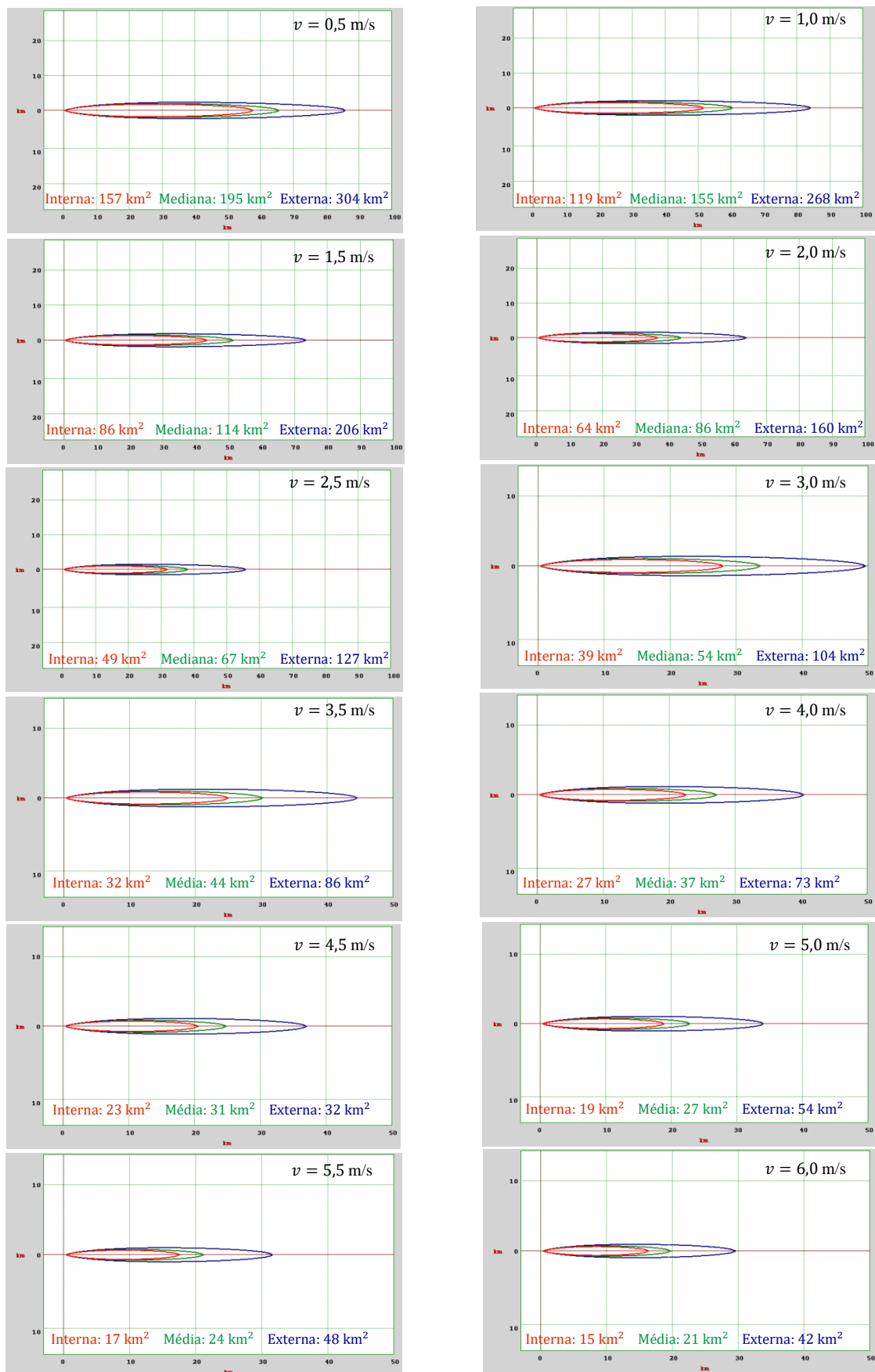


Figura 20: Classe de estabilidade D, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.

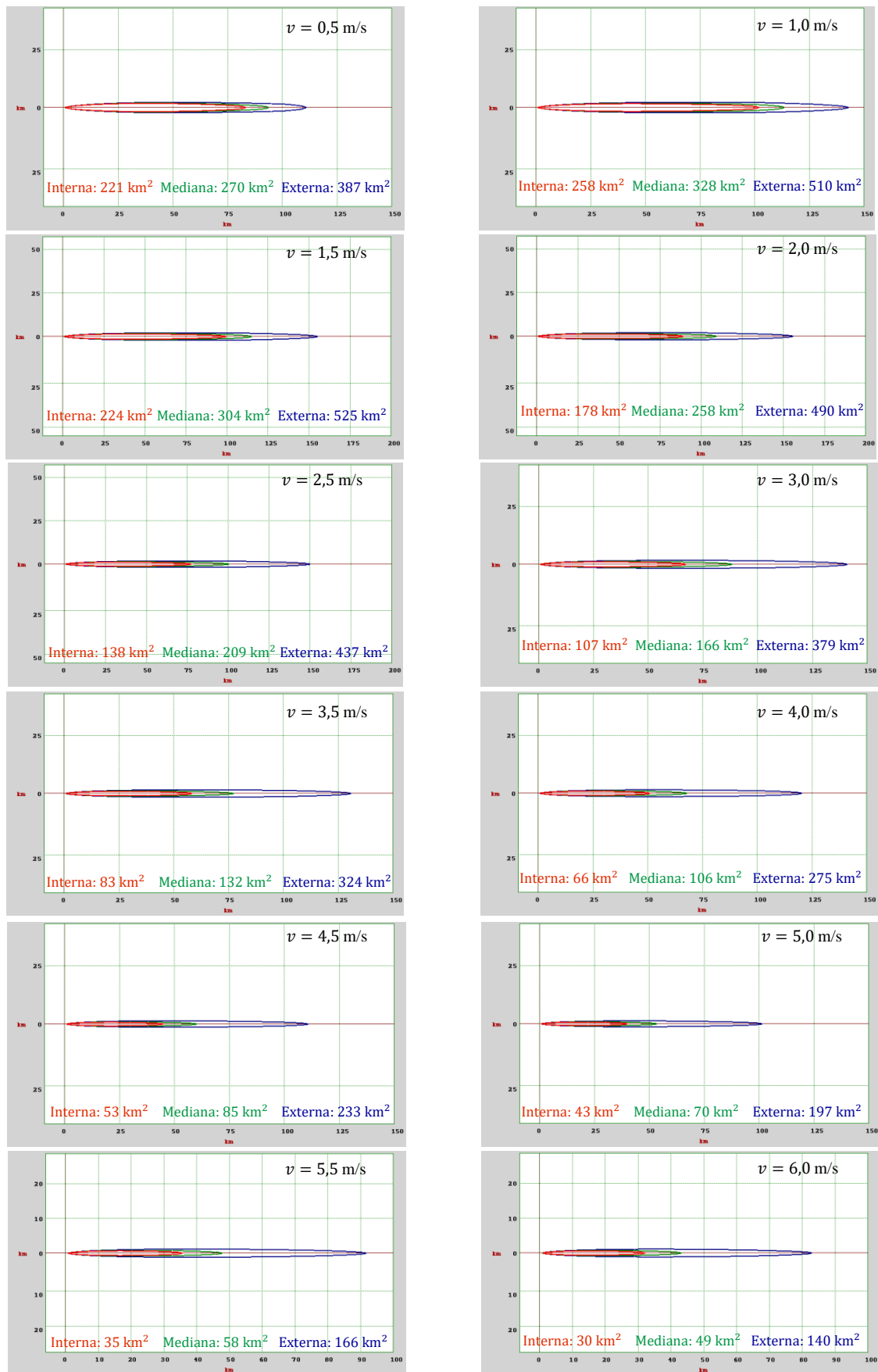


Figura 21: Classe de estabilidade E, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.

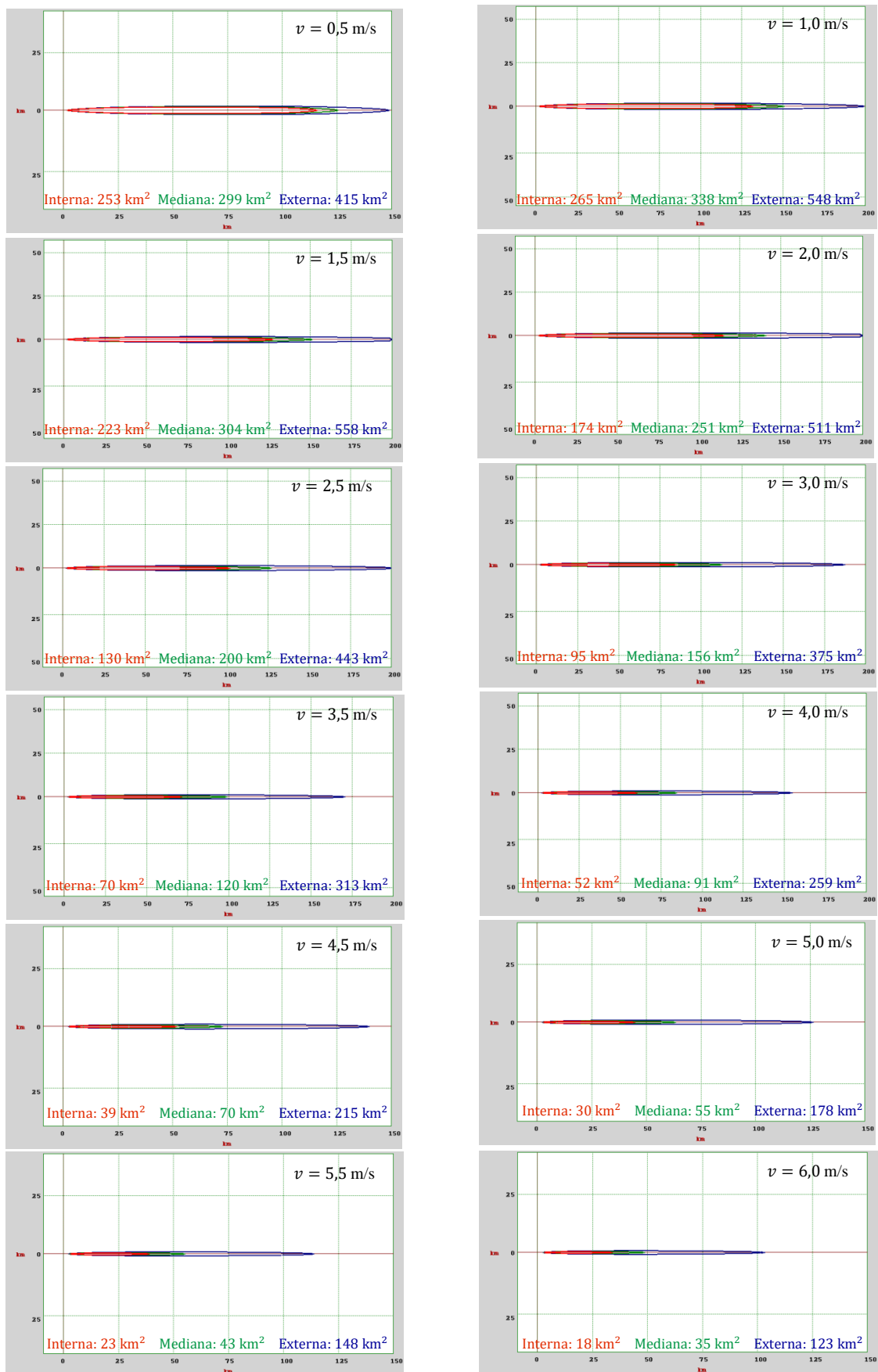


Figura 22: Classe de estabilidade F, variação das isodoses com a velocidade do vento em 10 metros.

APÊNDICE B: VARIAÇÃO DA DOSE EQUIVALENTE COMPROMETIDA MÁXIMA
DOS 23 ÓRGÃOS E TECIDOS

Tabela 7: Tireoide - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	3,5	3	2,6	1,5	0,71	0,22
1,0	1,7	1,5	1,3	0,77	0,36	0,11
1,5	1,2	1	0,88	0,52	0,24	0,077
2,0	0,87	0,75	0,66	0,39	0,18	0,058
2,5	0,7	0,6	0,53	0,31	0,14	0,047
3,0	0,58	0,5	0,44	0,26	0,12	0,039
3,5	0,5	0,43	0,38	0,22	0,1	0,033
4,0	0,43	0,38	0,33	0,19	0,091	0,029
4,5	0,39	0,33	0,29	0,17	0,081	0,026
5,0	0,35	0,3	0,26	0,16	0,073	0,023
5,5	0,32	0,27	0,24	0,14	0,066	0,021
6,0	0,29	0,25	0,22	0,13	0,061	0,02

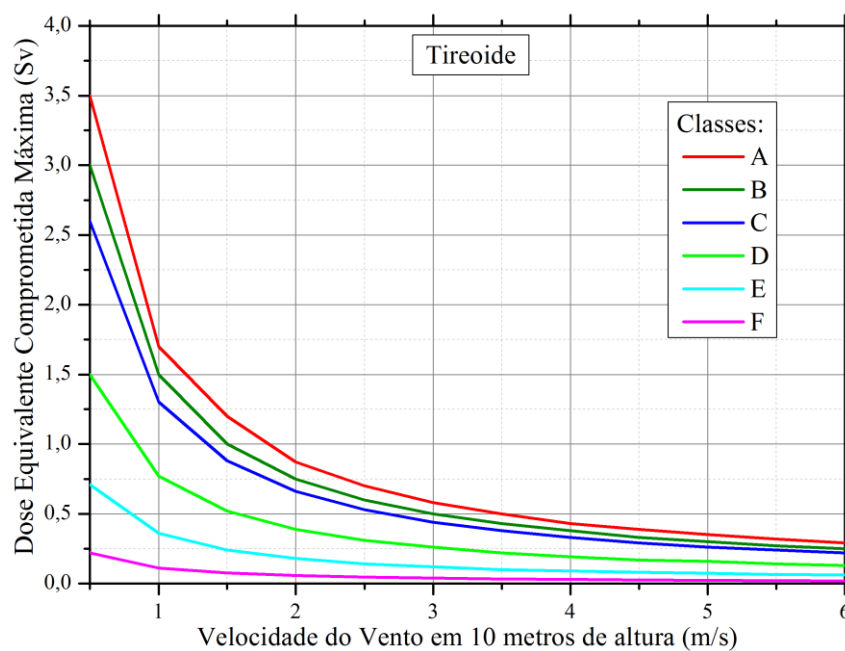


Figura 23: Tireoide - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 8: Pulmão - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,94	0,8	0,7	0,41	0,19	0,06
1,0	0,47	0,4	0,35	0,21	0,097	0,031
1,5	0,31	0,27	0,24	0,14	0,065	0,021
2,0	0,23	0,2	0,18	0,1	0,049	0,016
2,5	0,19	0,16	0,14	0,084	0,039	0,013
3,0	0,16	0,14	0,12	0,07	0,033	0,011
3,5	0,13	0,12	0,1	0,06	0,028	0,009
4,0	0,12	0,1	0,089	0,053	0,025	0,0079
4,5	0,1	0,09	0,079	0,047	0,022	0,007
5,0	0,094	0,081	0,071	0,042	0,02	0,0063
5,5	0,085	0,074	0,065	0,038	0,018	0,0058
6,0	0,078	0,068	0,059	0,035	0,016	0,0053

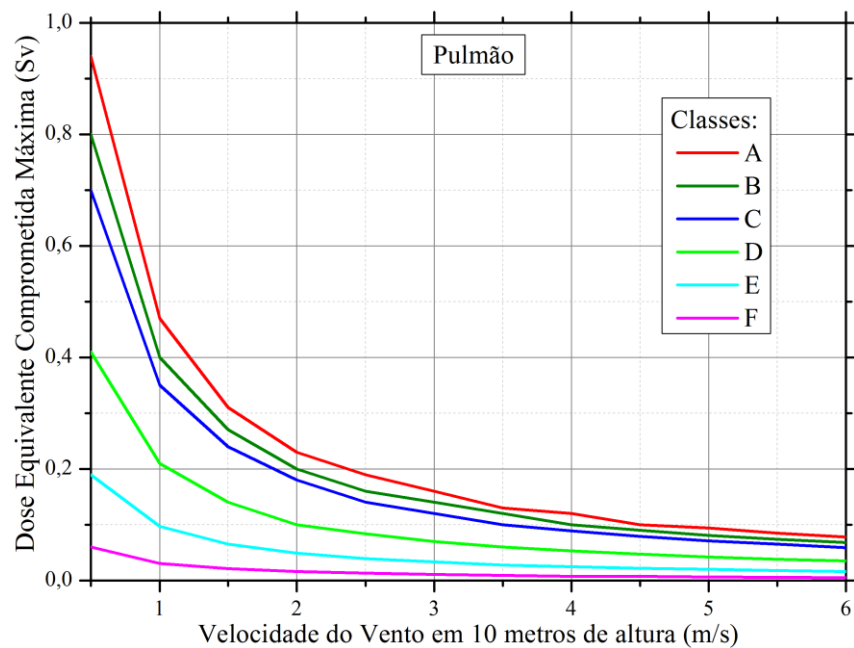


Figura 24: Pulmão - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 9: Esôfago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,44	0,37	0,32	0,19	0,088	0,027
1,0	0,22	0,19	0,16	0,097	0,045	0,014
1,5	0,15	0,13	0,11	0,065	0,03	0,0096
2,0	0,11	0,095	0,083	0,049	0,023	0,0072
2,5	0,088	0,076	0,066	0,039	0,018	0,0058
3,0	0,073	0,063	0,055	0,033	0,015	0,0049
3,5	0,063	0,054	0,047	0,028	0,013	0,0042
4,0	0,055	0,047	0,042	0,024	0,011	0,0037
4,5	0,049	0,042	0,037	0,022	0,01	0,0033
5,0	0,044	0,038	0,033	0,02	0,0092	0,0029
5,5	0,04	0,035	0,03	0,018	0,0083	0,0027
6,0	0,037	0,032	0,028	0,016	0,0076	0,0025

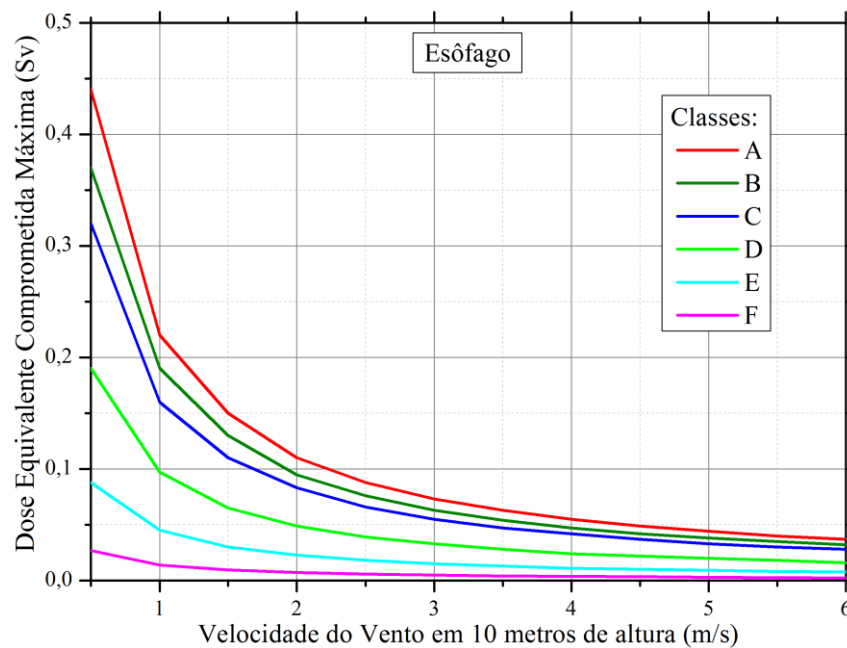


Figura 25: Esôfago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 10: Parede do Intestino Grosso Inferior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,25	0,22	0,19	0,11	0,052	0,016
1,0	0,13	0,11	0,096	0,056	0,026	0,0083
1,5	0,085	0,073	0,064	0,038	0,018	0,0056
2,0	0,063	0,055	0,048	0,028	0,013	0,0042
2,5	0,051	0,044	0,038	0,023	0,011	0,0034
3,0	0,042	0,037	0,032	0,019	0,0088	0,0028
3,5	0,036	0,031	0,028	0,016	0,0076	0,0024
4,0	0,032	0,027	0,024	0,014	0,0066	0,0021
4,5	0,028	0,024	0,021	0,013	0,0059	0,0019
5,0	0,025	0,022	0,019	0,011	0,0053	0,0017
5,5	0,023	0,02	0,018	0,01	0,0048	0,0016
6,0	0,021	0,018	0,016	0,0095	0,0044	0,0014

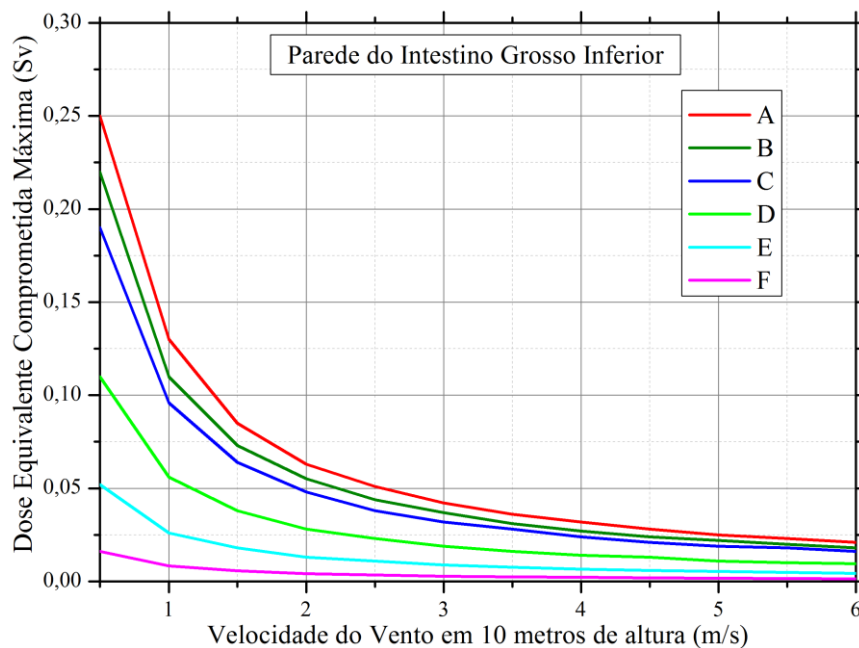


Figura 26: Parede do Intestino Grosso Inferior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 11: Superfície dos Ossos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,17	0,15	0,13	0,075	0,034	0,011
1,0	0,086	0,074	0,064	0,038	0,018	0,0056
1,5	0,057	0,049	0,043	0,025	0,012	0,0038
2,0	0,043	0,037	0,032	0,019	0,0089	0,0028
2,5	0,034	0,03	0,026	0,015	0,0071	0,0023
3,0	0,029	0,025	0,022	0,013	0,006	0,0019
3,5	0,025	0,021	0,019	0,011	0,0051	0,0016
4,0	0,021	0,019	0,016	0,0096	0,0045	0,0014
4,5	0,019	0,017	0,014	0,0085	0,004	0,0013
5,0	0,017	0,015	0,013	0,0077	0,0036	0,0012
5,5	0,016	0,014	0,012	0,007	0,0033	1E-3
6,0	0,014	0,012	0,011	0,0064	0,003	9,6E-4

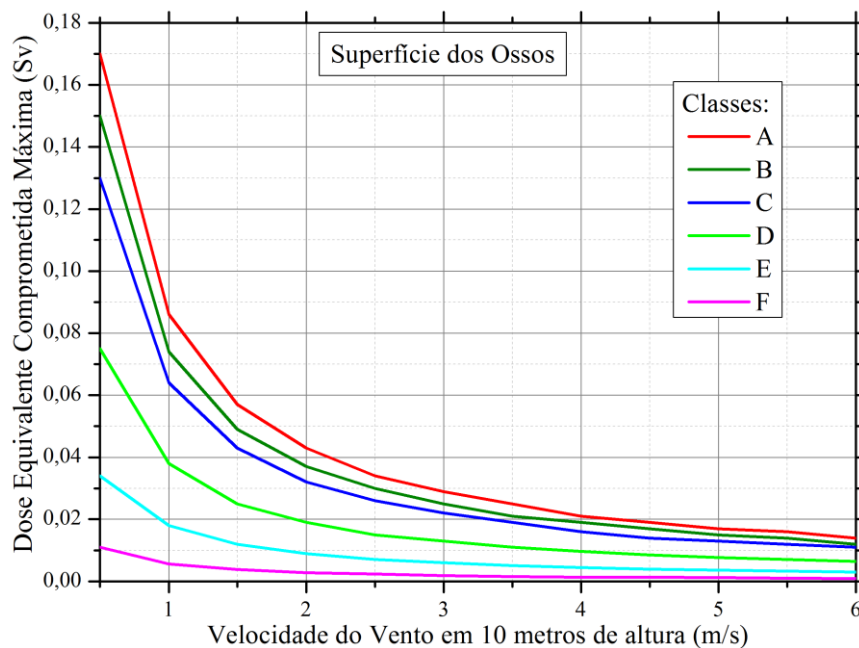


Figura 27: Superfície dos Ossos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 12: Parede do Intestino Grosso Superior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,13	0,11	0,099	0,058	0,027	0,0083
1,0	0,066	0,057	0,05	0,029	0,014	0,0043
1,5	0,044	0,038	0,033	0,02	0,0091	0,0029
2,0	0,033	0,029	0,025	0,015	0,0069	0,0022
2,5	0,027	0,023	0,02	0,012	0,0055	0,0018
3,0	0,022	0,019	0,017	0,0099	0,0046	0,0015
3,5	0,019	0,016	0,014	0,0085	0,0039	0,0013
4,0	0,017	0,014	0,013	0,0074	0,0035	0,0011
4,5	0,015	0,013	0,011	0,0066	0,0031	9,9E-4
5,0	0,013	0,011	0,01	0,0059	0,0028	8,9E-4
5,5	0,012	0,01	0,0091	0,0054	0,0025	8,1E-4
6,0	0,011	0,0096	0,0084	0,0049	0,0023	7,4E-4

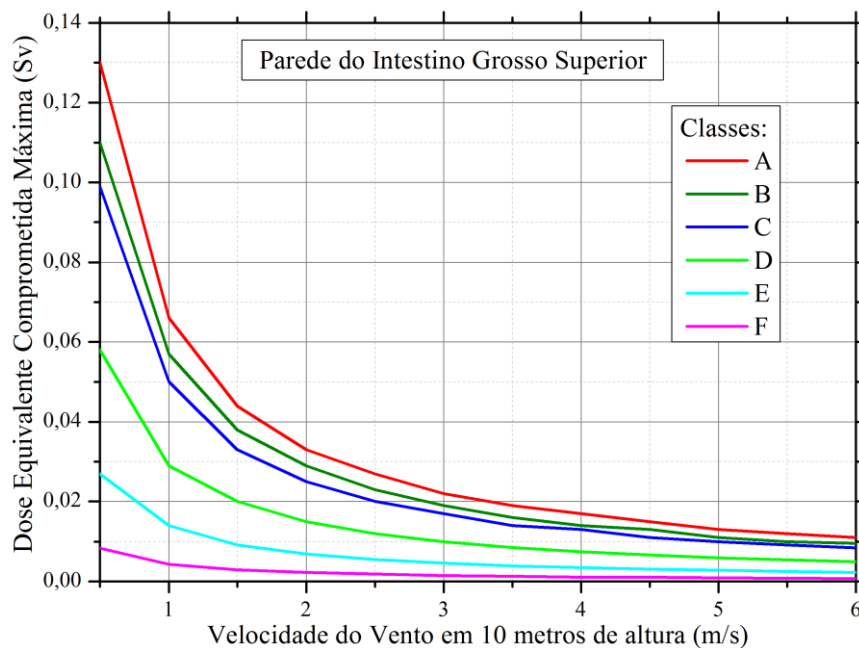


Figura 28: Parede do Intestino Grosso Superior - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 13: Medula Óssea Vermelha - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,11	0,092	0,08	0,047	0,022	0,0067
1,0	0,054	0,046	0,04	0,024	0,011	0,0035
1,5	0,036	0,031	0,027	0,016	0,0074	0,0024
2,0	0,027	0,023	0,02	0,012	0,0056	0,0018
2,5	0,022	0,019	0,016	0,0096	0,0045	0,0014
3,0	0,018	0,016	0,014	0,008	0,0037	0,0012
3,5	0,015	0,013	0,012	0,0069	0,0032	1E-3
4,0	0,013	0,012	0,01	0,006	0,0028	9E-4
4,5	0,012	0,01	0,0091	0,0053	0,0025	8E-4
5,0	0,011	0,0093	0,0082	0,0048	0,0022	7,2E-4
5,5	0,0098	0,0085	0,0074	0,0044	0,002	6,6E-4
6,0	0,009	0,0078	0,0068	0,004	0,0019	6E-4

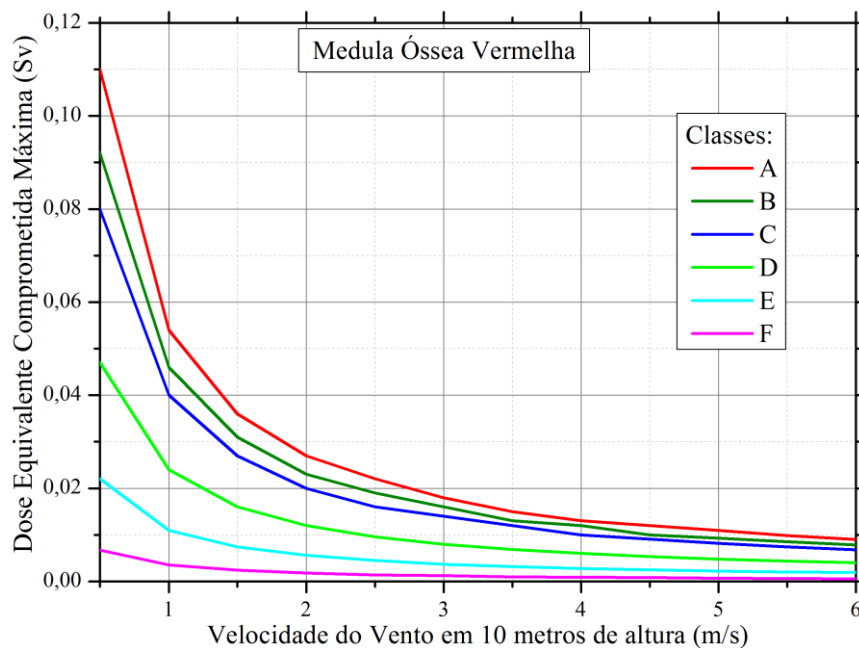


Figura 29: Medula Óssea Vermelha - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 14: Fígado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,095	0,082	0,071	0,042	0,019	0,0059
1,0	0,048	0,041	0,036	0,021	0,0098	0,0031
1,5	0,032	0,028	0,024	0,014	0,0066	0,0021
2,0	0,024	0,021	0,018	0,011	0,005	0,0016
2,5	0,019	0,017	0,015	0,0085	0,004	0,0013
3,0	0,016	0,014	0,012	0,0071	0,0033	0,0011
3,5	0,014	0,012	0,01	0,0061	0,0029	9,2E-4
4,0	0,012	0,01	0,0091	0,0054	0,0025	8E-4
4,5	0,011	0,0092	0,0081	0,0048	0,0022	7,1E-4
5,0	0,0096	0,0083	0,0073	0,0043	0,002	6,4E-4
5,5	0,0087	0,0075	0,0066	0,0039	0,0018	5,9E-4
6,0	0,008	0,0069	0,0061	0,0036	0,0017	5,4E-4

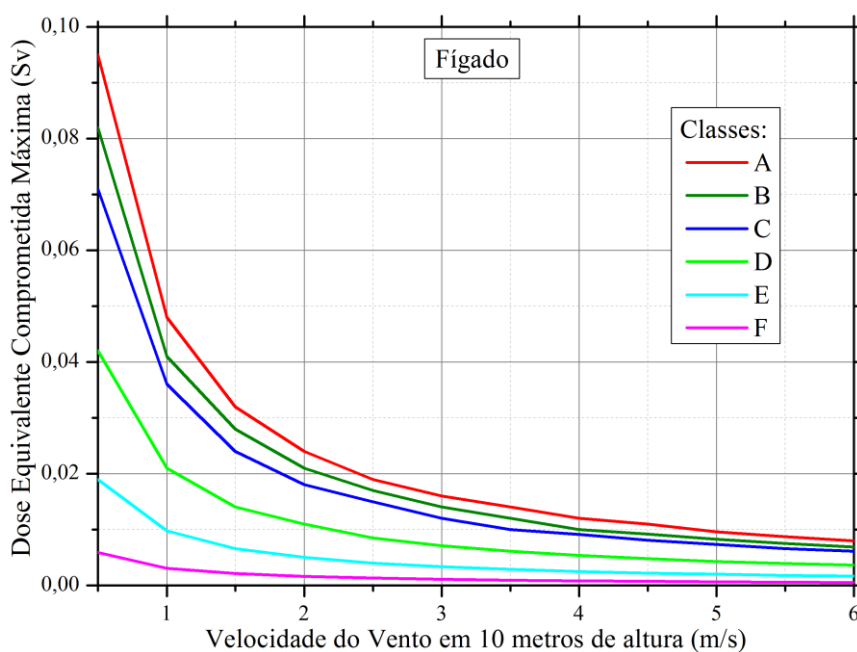


Figura 30: Fígado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 15: Parede da Bexiga - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,086	0,074	0,064	0,038	0,017	0,0053
1,0	0,043	0,037	0,033	0,019	0,0089	0,0028
1,5	0,029	0,025	0,022	0,013	0,006	0,0019
2,0	0,022	0,019	0,016	0,0097	0,0045	0,0014
2,5	0,017	0,015	0,013	0,0078	0,0036	0,0012
3,0	0,015	0,013	0,011	0,0065	0,003	9,7E-4
3,5	0,012	0,011	0,0094	0,0056	0,0026	8,3E-4
4,0	0,011	0,0094	0,0083	0,0049	0,0023	7,3E-4
4,5	0,0097	0,0084	0,0074	0,0043	0,002	6,5E-4
5,0	0,0087	0,0076	0,0066	0,0039	0,0018	5,9E-4
5,5	0,0079	0,0069	0,006	0,0035	0,0017	5,3E-4
6,0	0,0073	0,0063	0,0055	0,0033	0,0015	4,9E-4

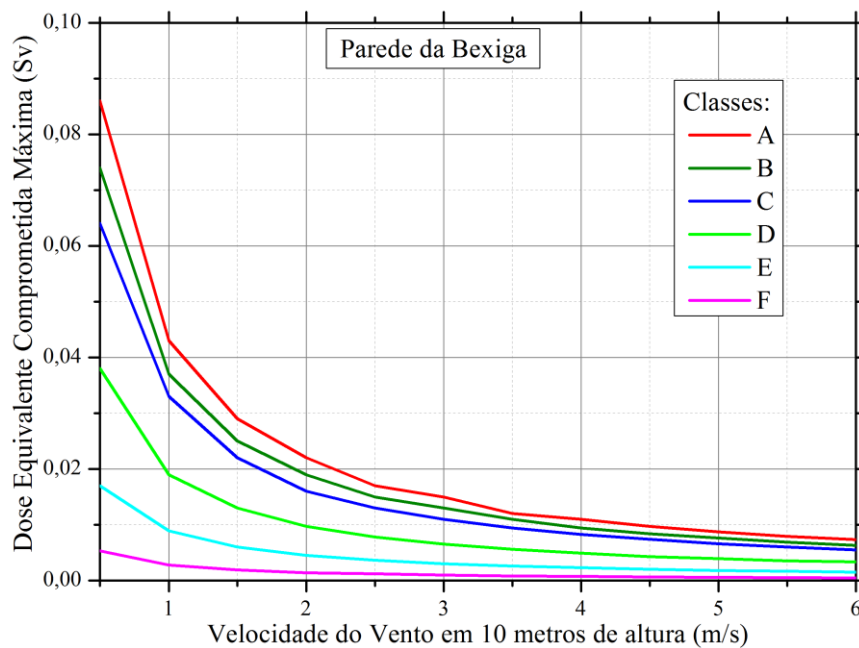


Figura 31: Parede da Bexiga - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 16: Parede do Intestino Delgado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,075	0,064	0,056	0,033	0,015	0,0046
1,0	0,038	0,032	0,028	0,017	0,0077	0,0024
1,5	0,025	0,022	0,019	0,011	0,0052	0,0016
2,0	0,019	0,016	0,014	0,0084	0,0039	0,0012
2,5	0,015	0,013	0,011	0,0067	0,0031	1E-3
3,0	0,013	0,011	0,0095	0,0056	0,0026	8,4E-4
3,5	0,011	0,0093	0,0082	0,0048	0,0022	7,2E-4
4,0	0,0095	0,0082	0,0072	0,0042	0,002	6,3E-4
4,5	0,0084	0,0073	0,0064	0,0038	0,0018	5,6E-4
5,0	0,0076	0,0065	0,0057	0,0034	0,0016	5,1E-4
5,5	0,0069	0,0059	0,0052	0,0031	0,0014	4,6E-4
6,0	0,0063	0,0055	0,0048	0,0028	0,0013	4,2E-4

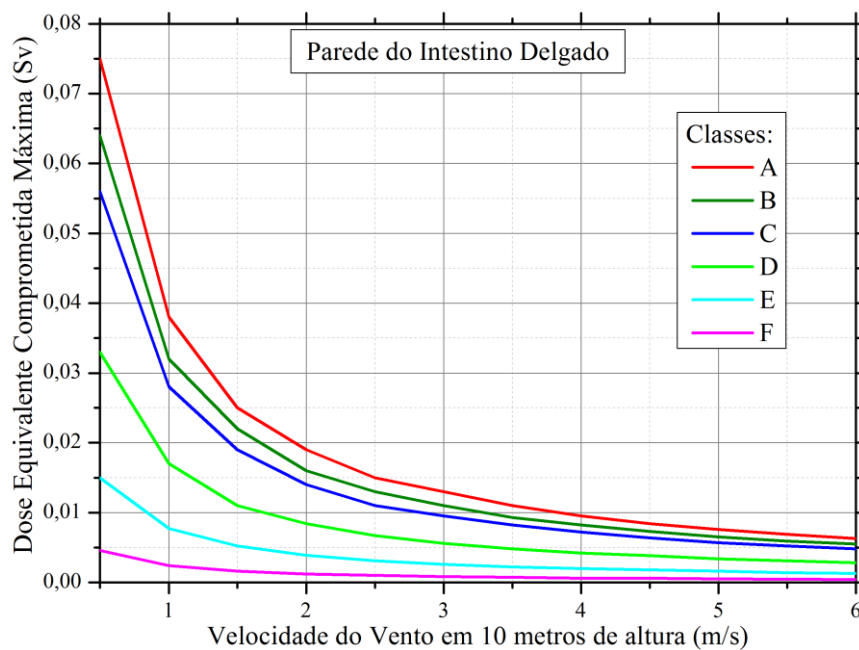


Figura 32: Parede do Intestino Delgado - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 17: Parede do Estômago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,069	0,059	0,051	0,03	0,014	0,0042
1,0	0,035	0,03	0,026	0,015	0,0071	0,0022
1,5	0,023	0,02	0,017	0,01	0,0048	0,0015
2,0	0,017	0,015	0,013	0,0077	0,0036	0,0011
2,5	0,014	0,012	0,011	0,0062	0,0029	9,2E-4
3,0	0,012	0,01	0,0088	0,0052	0,0024	7,7E-4
3,5	0,01	0,0086	0,0076	0,0044	0,0021	6,6E-4
4,0	0,0087	0,0075	0,0066	0,0039	0,0018	5,8E-4
4,5	0,0078	0,0067	0,0059	0,0035	0,0016	5,2E-4
5,0	0,007	0,006	0,0053	0,0031	0,0015	4,7E-4
5,5	0,0064	0,0055	0,0048	0,0028	0,0013	4,2E-4
6,0	0,0058	0,005	0,0044	0,0026	0,0012	3,9E-4

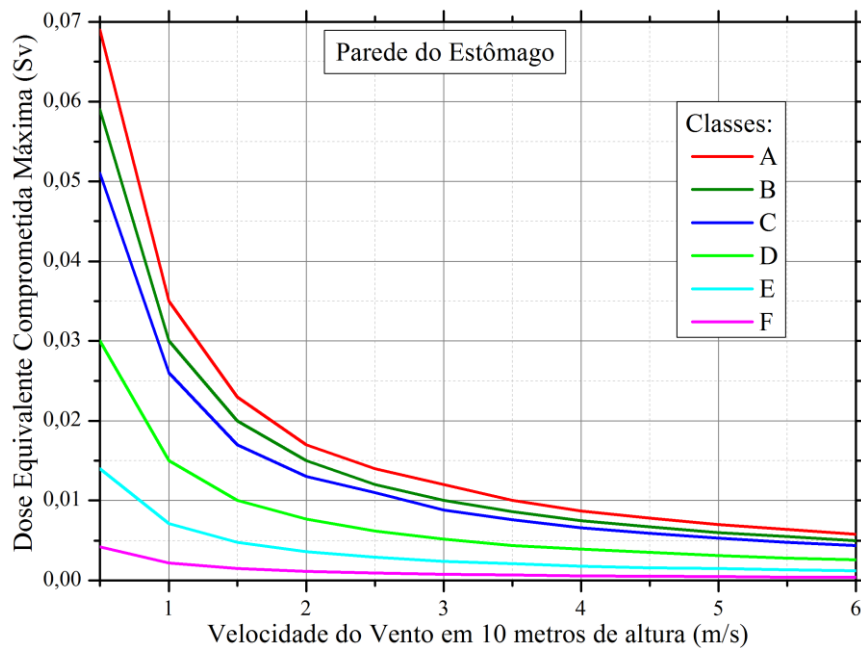


Figura 33: Parede do Estômago - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 18: Ovários - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,068	0,058	0,05	0,03	0,014	0,0042
1,0	0,034	0,029	0,026	0,015	0,007	0,0022
1,5	0,023	0,02	0,017	0,01	0,0047	0,0015
2,0	0,017	0,015	0,013	0,0076	0,0035	0,0011
2,5	0,014	0,012	0,01	0,0061	0,0028	9E-4
3,0	0,011	0,0098	0,0086	0,0051	0,0024	7,6E-4
3,5	0,0098	0,0084	0,0074	0,0043	0,002	6,5E-4
4,0	0,0085	0,0074	0,0065	0,0038	0,0018	5,7E-4
4,5	0,0076	0,0066	0,0058	0,0034	0,0016	5,1E-4
5,0	0,0068	0,0059	0,0052	0,0031	0,0014	4,6E-4
5,5	0,0062	0,0054	0,0047	0,0028	0,0013	4,2E-4
6,0	0,0057	0,0049	0,0043	0,0025	0,0012	3,8E-4

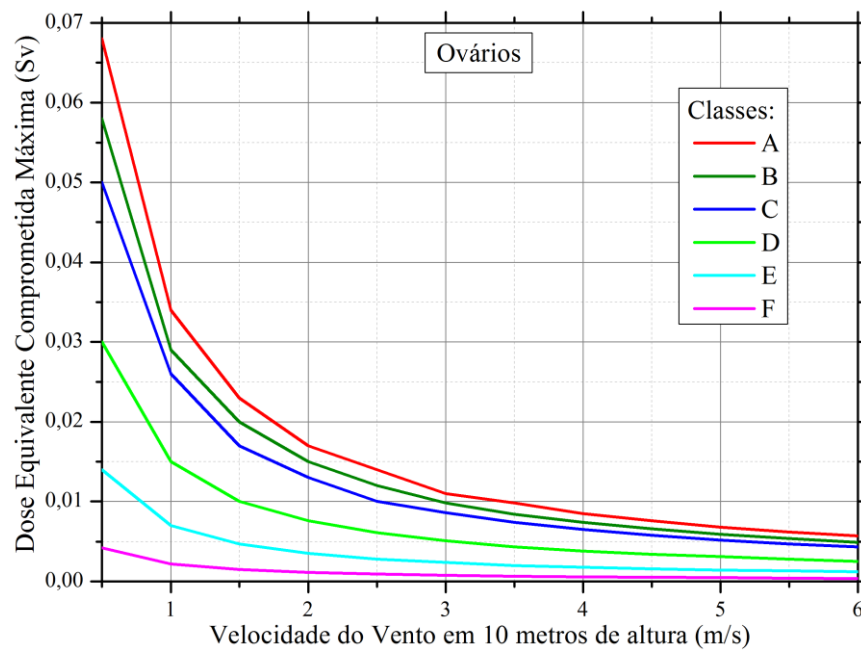


Figura 34: Ovários - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 19: Pele - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,067	0,057	0,049	0,028	0,013	0,0039
1,0	0,034	0,029	0,025	0,015	0,0068	0,0021
1,5	0,023	0,02	0,017	0,01	0,0046	0,0014
2,0	0,017	0,015	0,013	0,0075	0,0035	0,0011
2,5	0,014	0,012	0,01	0,0061	0,0028	8,8E-4
3,0	0,011	0,0099	0,0086	0,0051	0,0024	7,4E-4
3,5	0,0098	0,0085	0,0074	0,0044	0,002	6,4E-4
4,0	0,0086	0,0074	0,0065	0,0038	0,0018	5,6E-4
4,5	0,0077	0,0066	0,0058	0,0034	0,0016	5E-4
5,0	0,0069	0,006	0,0052	0,0031	0,0014	4,5E-4
5,5	0,0063	0,0054	0,0047	0,0028	0,0013	4,1E-4
6,0	0,0058	0,005	0,0043	0,0026	0,0012	3,8E-4

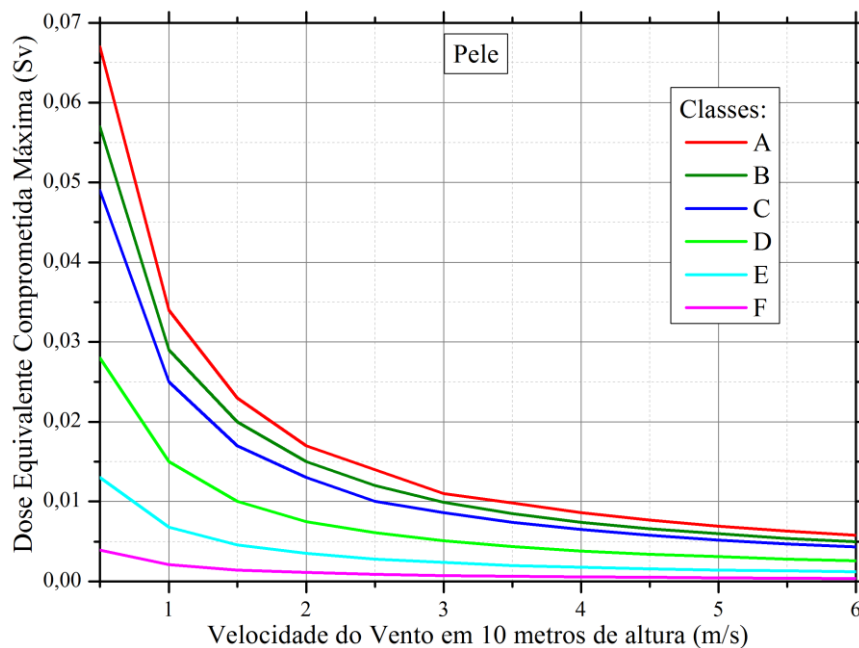


Figura 35: Pele - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 20: Timo - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,067	0,058	0,05	0,029	0,013	0,0041
1,0	0,034	0,029	0,025	0,015	0,0069	0,0022
1,5	0,023	0,02	0,017	0,01	0,0047	0,0015
2,0	0,017	0,015	0,013	0,0076	0,0035	0,0011
2,5	0,014	0,012	0,01	0,0061	0,0028	9E-4
3,0	0,011	0,0098	0,0086	0,0051	0,0024	7,5E-4
3,5	0,0097	0,0084	0,0074	0,0043	0,002	6,5E-4
4,0	0,0085	0,0074	0,0065	0,0038	0,0018	5,7E-4
4,5	0,0076	0,0066	0,0057	0,0034	0,0016	5,1E-4
5,0	0,0068	0,0059	0,0052	0,003	0,0014	4,6E-4
5,5	0,0062	0,0054	0,0047	0,0028	0,0013	4,2E-4
6,0	0,0057	0,0049	0,0043	0,0025	0,0012	3,8E-4

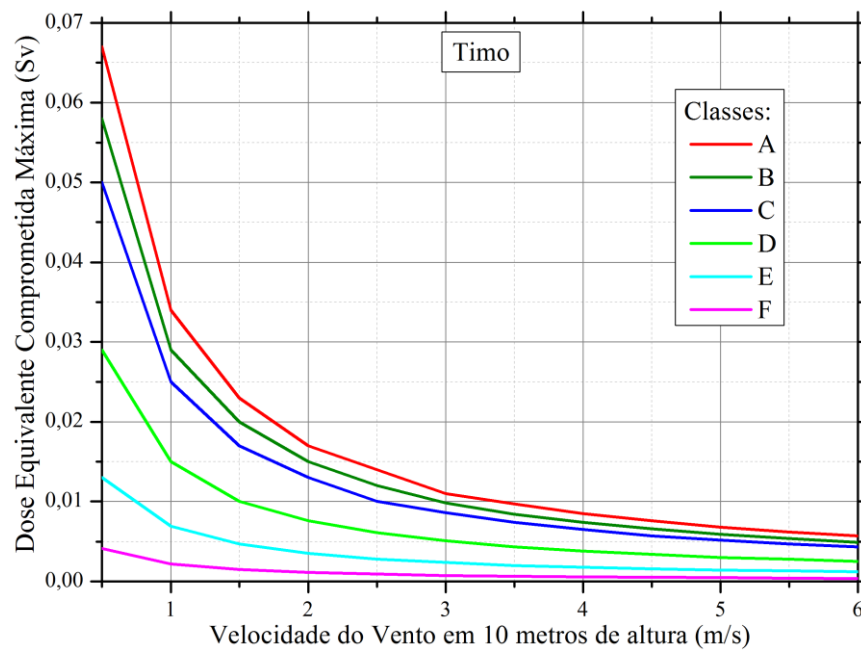


Figura 36: Timo - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 21: Glândulas Adrenais - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,0660	0,0570	0,0490	0,0290	0,0130	0,0041
1,0	0,0330	0,0290	0,0250	0,0150	0,0068	0,0021
1,5	0,0220	0,0190	0,0170	0,0098	0,0046	0,0015
2,0	0,0170	0,0140	0,0130	0,0074	0,0034	0,0011
2,5	0,0130	0,0120	0,0100	0,0059	0,0028	8,8E-04
3,0	0,0110	0,0096	0,0084	0,0050	0,0023	7,4E-04
3,5	0,0095	0,0082	0,0072	0,0043	0,0020	6,4E-04
4,0	0,0084	0,0072	0,0063	0,0037	0,0017	5,6E-04
4,5	0,0074	0,0064	0,0056	0,0033	0,0015	5E-04
5,0	0,0067	0,0058	0,0051	0,0030	0,0014	4,5E-04
5,5	0,0061	0,0053	0,0046	0,0027	0,0013	4,1E-04
6,0	0,0056	0,0048	0,0042	0,0025	0,0012	3,7E-04

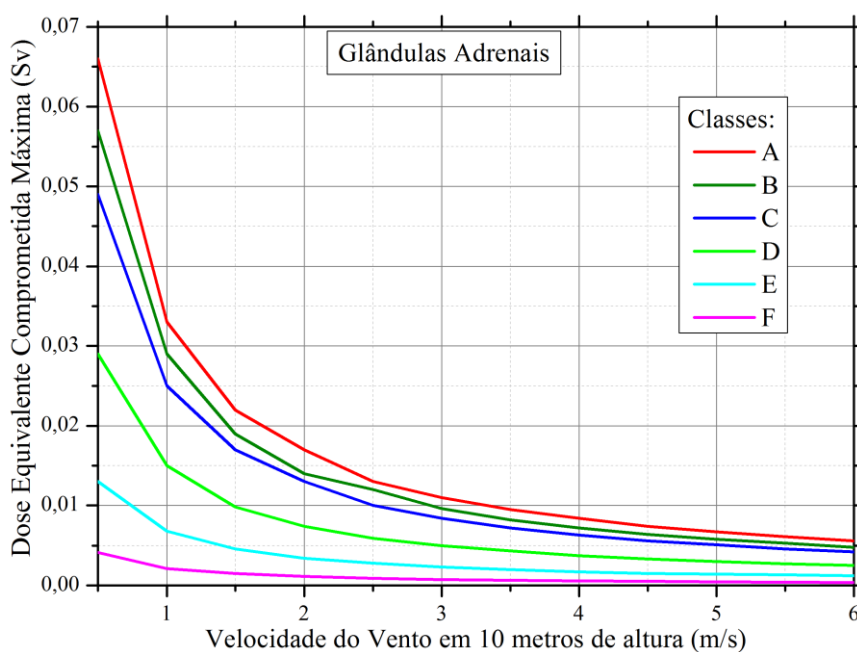


Figura 37: Glândulas Adrenais - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 22: Pâncreas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,065	0,056	0,049	0,029	0,013	0,004
1,0	0,033	0,028	0,025	0,015	0,0067	0,0021
1,5	0,022	0,019	0,017	0,0097	0,0045	0,0014
2,0	0,016	0,014	0,012	0,0073	0,0034	0,0011
2,5	0,013	0,011	0,01	0,0059	0,0027	8,7E-4
3,0	0,011	0,0095	0,0083	0,0049	0,0023	7,3E-4
3,5	0,0094	0,0082	0,0071	0,0042	0,002	6,3E-4
4,0	0,0083	0,0071	0,0063	0,0037	0,0017	5,5E-4
4,5	0,0073	0,0063	0,0056	0,0033	0,0015	4,9E-4
5,0	0,0066	0,0057	0,005	0,0029	0,0014	4,4E-4
5,5	0,006	0,0052	0,0046	0,0027	0,0013	4E-4
6,0	0,0055	0,0048	0,0042	0,0025	0,0011	3,7E-4

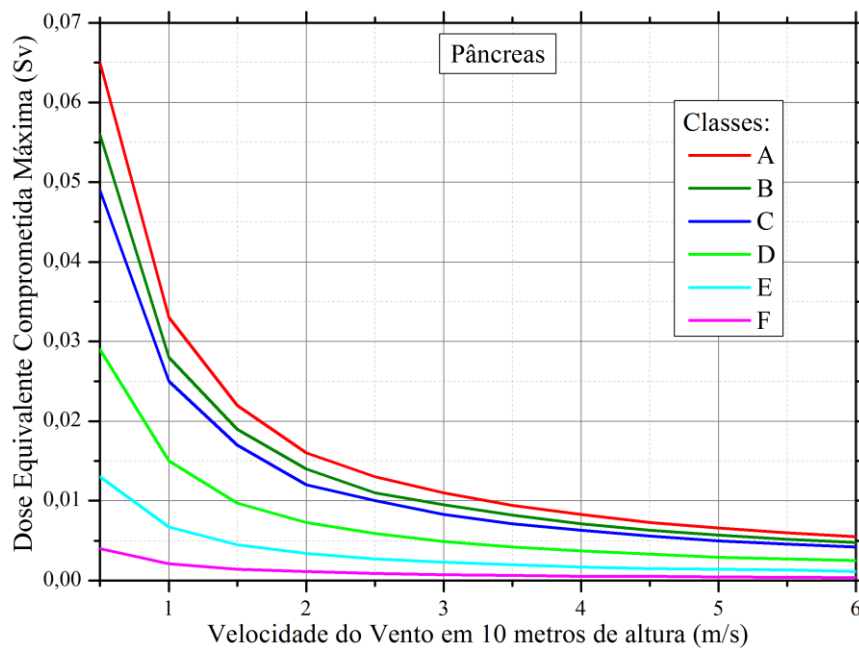


Figura 38: Pâncreas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 23: Baço - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,063	0,054	0,047	0,028	0,013	0,0039
1,0	0,032	0,027	0,024	0,014	0,0065	0,002
1,5	0,021	0,018	0,016	0,0094	0,0044	0,0014
2,0	0,016	0,014	0,012	0,0071	0,0033	0,0011
2,5	0,013	0,011	0,0097	0,0057	0,0027	8,5E-4
3,0	0,011	0,0092	0,0081	0,0048	0,0022	7,1E-4
3,5	0,0092	0,0079	0,0069	0,0041	0,0019	6,1E-4
4,0	0,008	0,0069	0,0061	0,0036	0,0017	5,3E-4
4,5	0,0071	0,0062	0,0054	0,0032	0,0015	4,8E-4
5,0	0,0064	0,0055	0,0049	0,0029	0,0013	4,3E-4
5,5	0,0058	0,005	0,0044	0,0026	0,0012	3,9E-4
6,0	0,0054	0,0046	0,0041	0,0024	0,0011	3,6E-4

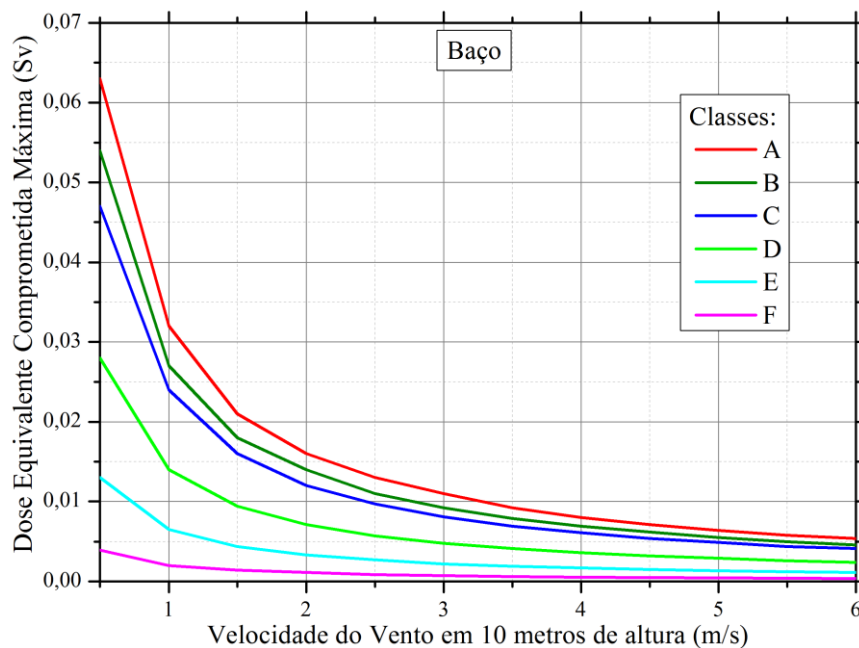


Figura 39: Baço - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 24: Útero - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,063	0,054	0,047	0,028	0,013	0,0039
1,0	0,032	0,027	0,024	0,014	0,0065	0,002
1,5	0,021	0,018	0,016	0,0094	0,0044	0,0014
2,0	0,016	0,014	0,012	0,0071	0,0033	0,0011
2,5	0,013	0,011	0,0097	0,0057	0,0027	8,5E-4
3,0	0,011	0,0092	0,0081	0,0047	0,0022	7,1E-4
3,5	0,0091	0,0079	0,0069	0,0041	0,0019	6,1E-4
4,0	0,008	0,0069	0,0061	0,0036	0,0017	5,3E-4
4,5	0,0071	0,0061	0,0054	0,0032	0,0015	4,8E-4
5,0	0,0064	0,0055	0,0049	0,0029	0,0013	4,3E-4
5,5	0,0058	0,005	0,0044	0,0026	0,0012	3,9E-4
6,0	0,0053	0,0046	0,004	0,0024	0,0011	3,6E-4

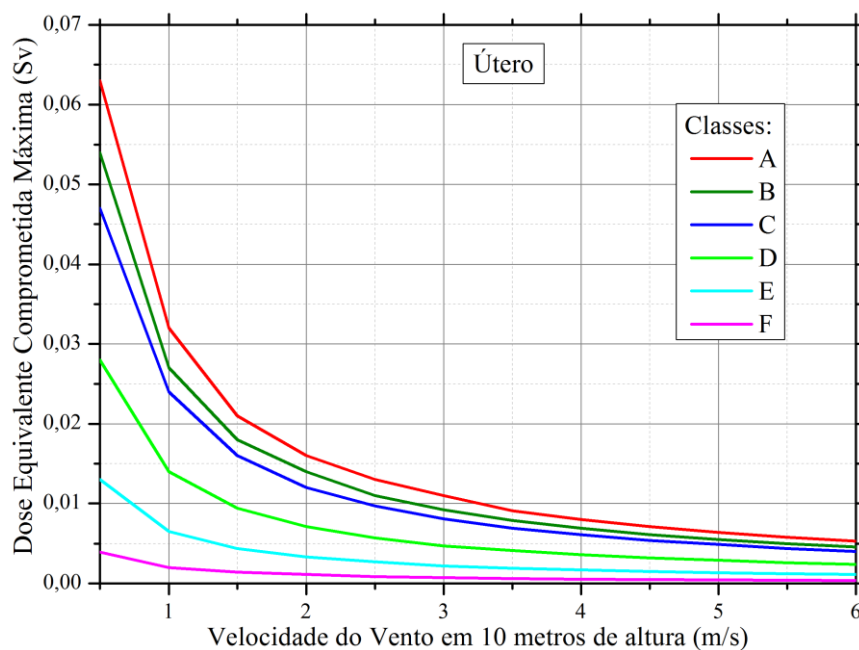


Figura 40: Útero - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 25: Rins - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,062	0,053	0,046	0,027	0,012	0,0038
1,0	0,031	0,027	0,023	0,014	0,0063	0,002
1,5	0,021	0,018	0,016	0,0092	0,0043	0,0013
2,0	0,016	0,013	0,012	0,0069	0,0032	1E-3
2,5	0,012	0,011	0,0094	0,0055	0,0026	8,2E-4
3,0	0,01	0,009	0,0079	0,0046	0,0022	6,9E-4
3,5	0,0089	0,0077	0,0067	0,004	0,0019	5,9E-4
4,0	0,0078	0,0067	0,0059	0,0035	0,0016	5,2E-4
4,5	0,0069	0,006	0,0053	0,0031	0,0014	4,6E-4
5,0	0,0062	0,0054	0,0047	0,0028	0,0013	4,2E-4
5,5	0,0057	0,0049	0,0043	0,0025	0,0012	3,8E-4
6,0	0,0052	0,0045	0,0039	0,0023	0,0011	3,5E-4

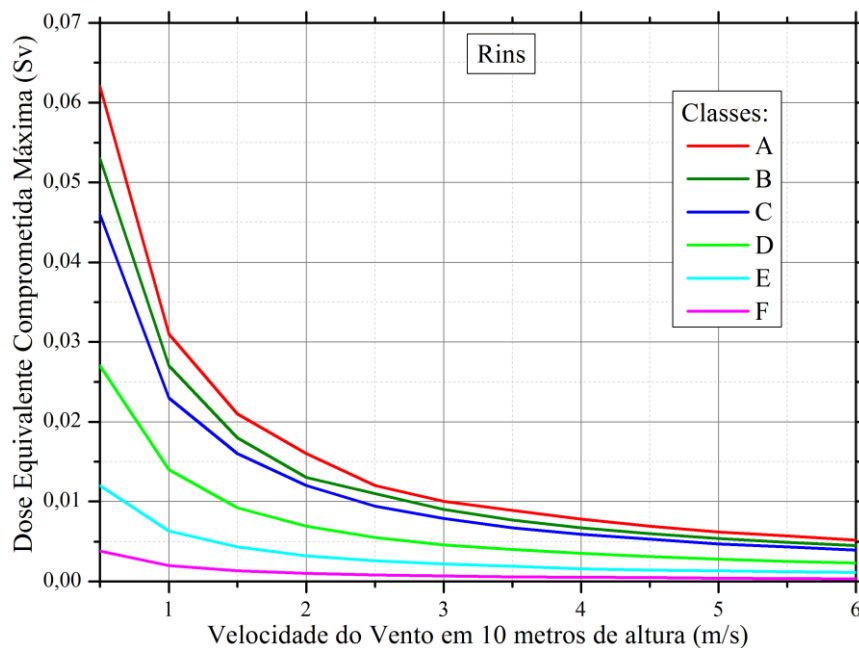


Figura 41: Rins - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 26: Mamas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,061	0,052	0,045	0,026	0,012	0,0037
1,0	0,031	0,026	0,023	0,013	0,0062	0,0019
1,5	0,021	0,018	0,015	0,0091	0,0042	0,0013
2,0	0,015	0,013	0,012	0,0068	0,0032	1E-3
2,5	0,012	0,011	0,0093	0,0055	0,0025	8,1E-4
3,0	0,01	0,0089	0,0078	0,0046	0,0021	6,8E-4
3,5	0,0088	0,0076	0,0067	0,0039	0,0018	5,8E-4
4,0	0,0077	0,0067	0,0058	0,0034	0,0016	5,1E-4
4,5	0,0069	0,0059	0,0052	0,0031	0,0014	4,6E-4
5,0	0,0062	0,0053	0,0047	0,0028	0,0013	4,1E-4
5,5	0,0056	0,0049	0,0043	0,0025	0,0012	3,8E-4
6,0	0,0052	0,0045	0,0039	0,0023	0,0011	3,4E-4

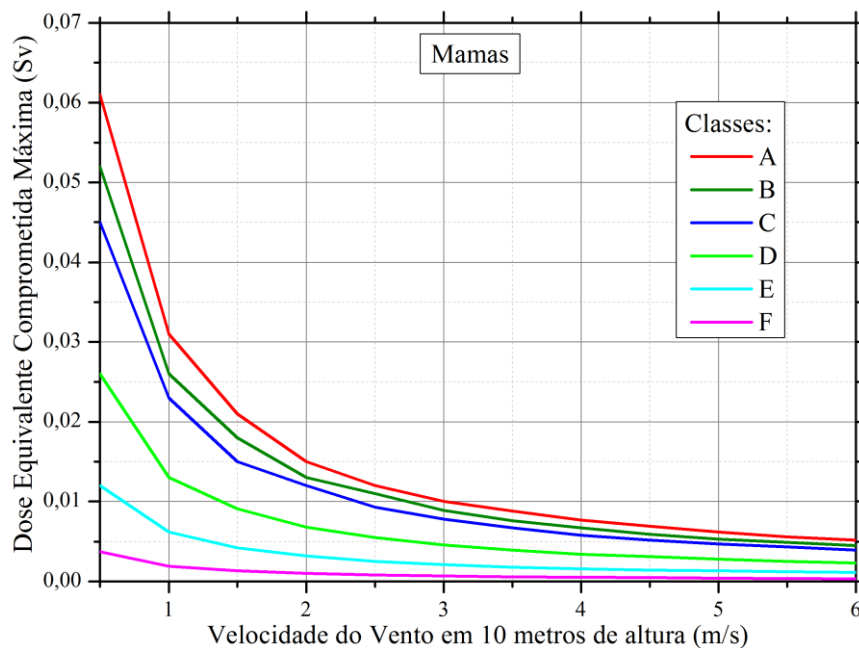


Figura 42: Mamas - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 27: Músculos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,06	0,052	0,045	0,026	0,012	0,0037
1,0	0,03	0,026	0,023	0,013	0,0062	0,0019
1,5	0,02	0,017	0,015	0,009	0,0042	0,0013
2,0	0,015	0,013	0,011	0,0068	0,0031	1E-3
2,5	0,012	0,011	0,0092	0,0054	0,0025	8E-4
3,0	0,01	0,0088	0,0077	0,0045	0,0021	6,7E-4
3,5	0,0087	0,0075	0,0066	0,0039	0,0018	5,8E-4
4,0	0,0076	0,0066	0,0058	0,0034	0,0016	5,1E-4
4,5	0,0068	0,0059	0,0051	0,003	0,0014	4,5E-4
5,0	0,0061	0,0053	0,0046	0,0027	0,0013	4,1E-4
5,5	0,0056	0,0048	0,0042	0,0025	0,0012	3,7E-4
6,0	0,0051	0,0044	0,0039	0,0023	0,0011	3,4E-4

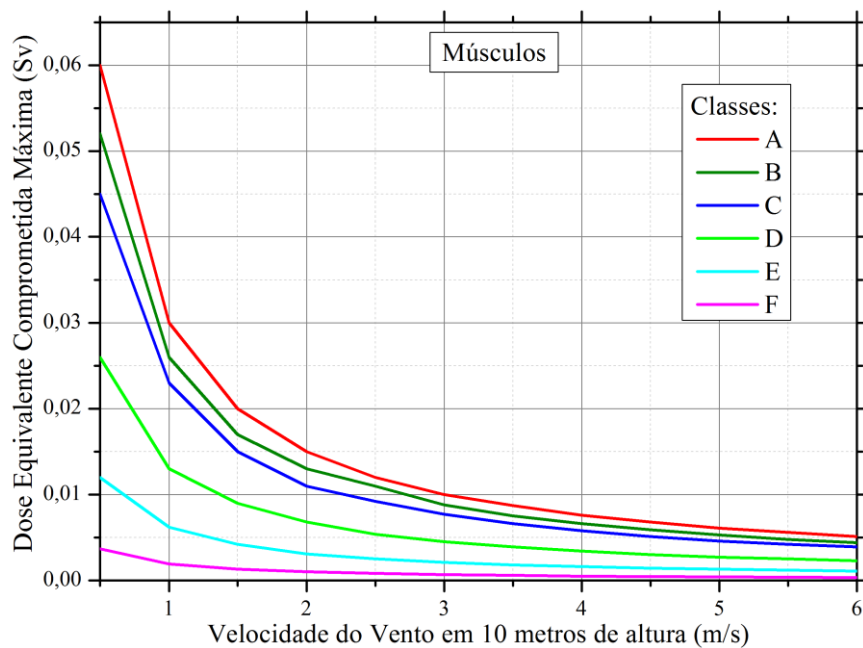


Figura 43: Músculos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 28: Cérebro - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,056	0,047	0,041	0,024	0,011	0,0033
1,0	0,028	0,024	0,021	0,012	0,0057	0,0018
1,5	0,019	0,016	0,014	0,0082	0,0038	0,0012
2,0	0,014	0,012	0,011	0,0062	0,0029	9,2E-4
2,5	0,011	0,0097	0,0085	0,005	0,0023	7,4E-4
3,0	0,0094	0,0081	0,0071	0,0042	0,0019	6,2E-4
3,5	0,008	0,0069	0,0061	0,0036	0,0017	5,3E-4
4,0	0,007	0,0061	0,0053	0,0031	0,0015	4,7E-4
4,5	0,0063	0,0054	0,0047	0,0028	0,0013	4,2E-4
5,0	0,0056	0,0049	0,0043	0,0025	0,0012	3,8E-4
5,5	0,0051	0,0044	0,0039	0,0023	0,0011	3,4E-4
6,0	0,0047	0,0041	0,0036	0,0021	9,8E-4	3,1E-4

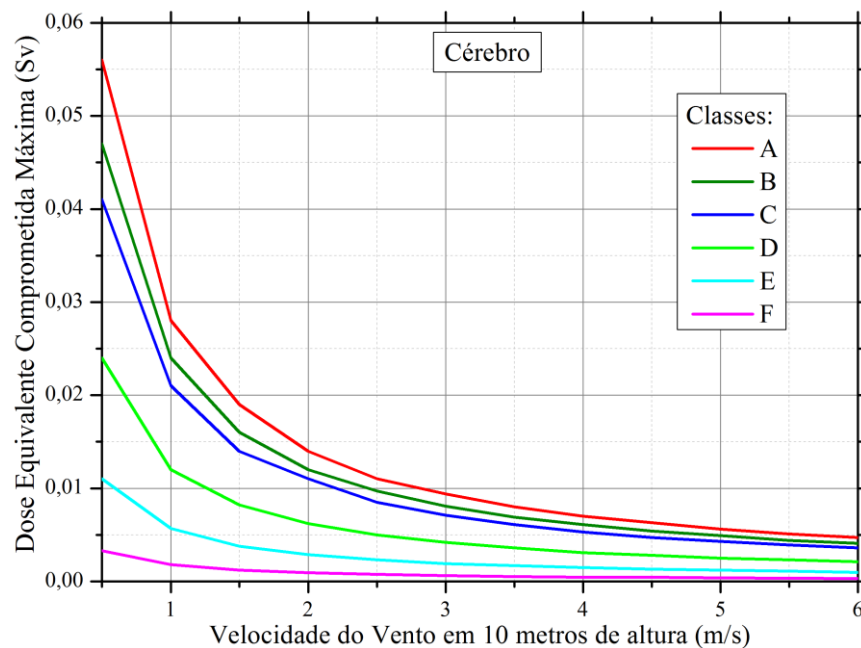


Figura 44: Cérebro - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Tabela 29: Testículos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.

Velocidade (m/s)	Dose Equivalente Comprometida Máxima (Sv)					
	A	B	C	D	E	F
0,5	0,056	0,048	0,042	0,024	0,011	0,0034
1,0	0,028	0,024	0,021	0,012	0,0058	0,0018
1,5	0,019	0,016	0,014	0,0084	0,0039	0,0012
2,0	0,014	0,012	0,011	0,0063	0,0029	9,3E-4
2,5	0,011	0,0098	0,0086	0,0051	0,0024	7,5E-4
3,0	0,0095	0,0082	0,0072	0,0042	0,002	6,3E-4
3,5	0,0082	0,007	0,0062	0,0036	0,0017	5,4E-4
4,0	0,0071	0,0062	0,0054	0,0032	0,0015	4,7E-4
4,5	0,0063	0,0055	0,0048	0,0028	0,0013	4,2E-4
5,0	0,0057	0,0049	0,0043	0,0025	0,0012	3,8E-4
5,5	0,0052	0,0045	0,0039	0,0023	0,0011	3,5E-4
6,0	0,0048	0,0041	0,0036	0,0021	9,9E-4	3,2E-4

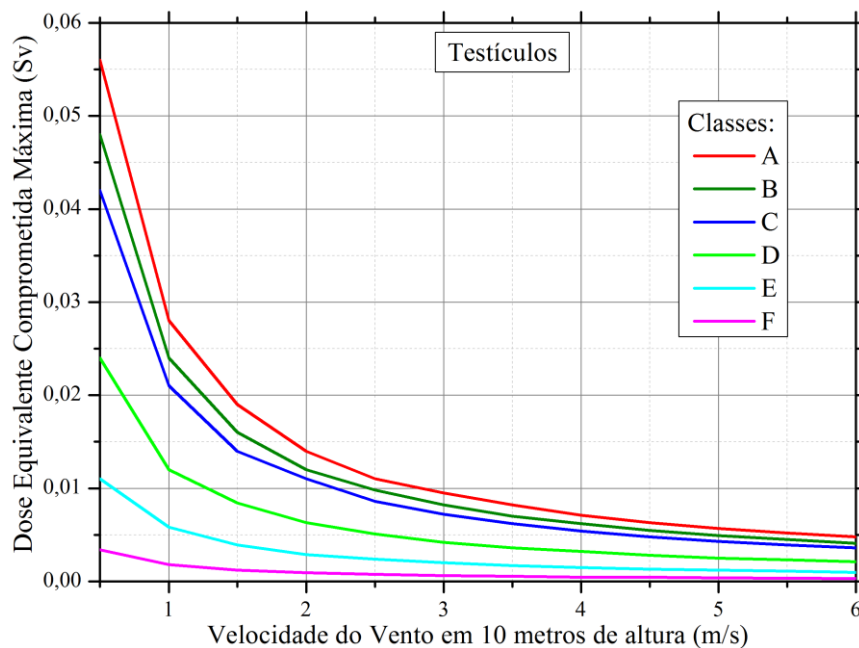


Figura 45: Testículos - Variação da Dose Equivalente Comprometida Máxima com a Velocidade do Vento em 10 metros de altura.