



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

MARIA RITA SILVA ARAUJO

MODELO DE AVALIAÇÃO DE RADÔNIO USANDO SIMULAÇÃO CFD

Recife

2022

MARIA RITA SILVA ARAUJO

MODELO DE AVALIAÇÃO DE RADÔNIO USANDO SIMULAÇÃO CFD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear

Orientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

Coorientadora: Profa. Dra. Zahily Herrero Fernández

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

A663m Araújo, Maria Rita Silva.
 Modelo de avaliação de radônio usando simulação CFD. / Maria Rita Silva
 Araújo. – 2022.
 68 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior.
 Coorientadora: Profa. Dra. Zahily Herrero Fernández.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa
 de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2022.
 Inclui referências.

 1. Radioatividade. 2. CFD. 3. Dosimetria. 4. Radônio. 5. Simulação.
 I. Santos Júnior, José Araújo dos (orientador). II. Herrero Fernández, Zahily
 (coorientadora). III. Título.

539.752 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2022-385

MARIA RITA SILVA ARAÚJO

MODELO DE AVALIAÇÃO DE RADÔNIO USANDO SIMULAÇÃO CFD

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Aprovado em: 29/07/2022

BANCA EXAMINADORA

Dr. Romilton dos Santos Amaral (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dr. Jussíê Soares da Rocha (Examinador Externo)

Instituto Federal do Maranhão - IFMA

Dr. Abel Gámez Rodríguez (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir viver esse momento.

À minha mãe, dona Rita de Cássia da Silva Araújo, por ter dedicado toda sua vida para que eu e meu irmão pudéssemos realizar os nossos sonhos. Obrigada pela educação, apoio e incentivo durante toda minha vida. Sem a senhora eu não seria nada. Te amo!

Ao meu irmão, João Victor Silva Araújo, por todo apoio, ser meu espelho, por cuidar da nossa mãe e me incentivar em toda minha vida. Vocês são meu tesouro. Te amo!

Ao meu pai, Francisco Carlos Araújo, (*in memoriam*), pela existência em minha vida.

A todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado, partilhando das alegrias e dificuldades.

Ao meu namorado, Jefferson Fausto, obrigada pelo companheirismo, por me ajudar a suportar a saudade de casa, por ser meu apoio em momentos de crises e angústias. E toda sua família, obrigada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior, pela amizade, por todas as orientações, por esclarecer minhas dúvidas, sem sua ajuda esse trabalho não teria sido concluído. Obrigada pela confiança e compreensão nos momentos de dificuldade.

À minha coorientadora Dra. Zahily Herrero Fernández, pela parceria, por todo auxílio que me prestou nos momentos de dificuldade durante a escrita do texto.

À banca, por todas as contribuições para melhoria desse trabalho.

Ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por todo suporte estrutural para o desenvolvimento desse trabalho e ao corpo docente, por todo conhecimento transmitido.

Aos amigos que fiz ao longo dessa trajetória no Grupo de Radioecologia, Ariosto, Alberto, Marcela, Danusa, Andrey, Rodrigo, Julieta, Nilson, Neide. Obrigada por todo acolhimento e amizade. Todos moram no meu coração.

Aos professores Jussiê e Wilson Seraine, que acreditaram que eu conseguiria passar por esta etapa.

Ao Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN)

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE),
pela ajuda financeira.

RESUMO

Estudos radiométricos sobre a influência do radônio e sua progênie vêm sendo intensificados a nível mundial. O radônio emana do solo, das rochas e dos materiais de construção e tem sua concentração aumentada em locais fechados ou com pouca ventilação. A inalação desse gás pode gerar danos à saúde dos seres humanos devido a sua emissão alfa e aos seus produtos de decaimento de vida curta, Po-218, Po-214, Bi-214, Pb-214, que são depositados nos tecidos pulmonares. A monitoração com métodos eficientes proporciona o melhor entendimento do comportamento desse radionuclídeo em ambientes fechados, onde ocorrem os maiores riscos. A realização de simulações com Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, pelas siglas em inglês), para o estudo da distribuição de radônio em ambientes internos é bastante vantajosa no que diz respeito à economia e tempo de resposta em relação aos experimentos convencionais, permitindo melhor entendimento dos níveis do radônio dispersos no ar e possibilitando a estimativa da exposição dos indivíduos a curto e longo prazo. Assumindo essa aplicabilidade, este estudo teve como objetivo determinar via modelagem por CFD, aplicando o software Ansys CFX, o comportamento do radônio em ambiente controlado e com alta radioatividade de fundo. O local de teste foi a sala de guarda de amostras localizada no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, que apresenta fundo radioativo alterado devido à presença de fontes ambientais. O estudo permitiu a construção de um modelo físico matemático e geração de gráficos 3D da dispersão desse radionuclídeo nesta sala de amostras usando ANSYS CFX a partir da liberação desse gás por meio de fontes radioativas ambientais. Foi feita a comparação dos resultados obtidos na simulação com os obtidos de forma experimental, usando o detector AlphaGUARD. A simulação CFD com ANSYS CFX mostrou que as áreas de maior concentração de radônio são observadas próximo das fontes, além disso, a simulação obteve resultados qualitativos satisfatórios para estimar o comportamento do radônio na sala de amostras.

Palavras-chave: CFD; dosimetria; radioatividade; radônio; simulação.

ABSTRACT

Radiometric studies on the influence of radon and its progeny have been intensified worldwide. Radon emanates from soil, rocks and building materials and is concentrated in closed or poorly ventilated areas. Inhalation of this gas can damage human health due to its alpha emission and short-lived decay products, Po-218, Po-214, Bi-214, and Pb-214, deposited in lung tissues. Monitoring with efficient methods provides a better understanding of the behaviour of this radionuclide in closed environments, where the most significant risks occur. The performance of simulations with Computational Fluid Dynamics (CFD) for the study of the distribution of radon in indoor environments is very advantageous in terms of economy and response time in relation to conventional experiments, allowing a better understanding of the levels of radon dispersed in the air and making it possible to estimate the exposure of individuals in the short and long term. This study aims to determine, via CFD modelling, applying the Ansys CFX software, the behaviour of radon in a controlled environment and with high background. The test site was the sample storage room at the Department of Nuclear Energy of the Federal University of Pernambuco - UFPE, which has an altered radioactive background due to environmental sources. The study allowed the construction of a mathematical-physical model and the generation of 3D graphics of the dispersion of this radionuclide in this sample room using ANSYS CFX from releasing this gas through radioactive environmental sources. The results obtained in the simulation were compared with those obtained experimentally using the AlphaGUARD detector. The CFD simulation with ANSYS CFX showed that the areas with the highest radon concentration are observed close to the sources. In addition, the simulation obtained satisfactory qualitative results to estimate the behaviour of radon in the sample room.

Keywords: CFD; dosimetry; radioactivity; radon; simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dose individual média anual decorrente de fontes naturais e artificiais.....	16
Figura 2 – Dose individual média anual decorrente de fontes naturais.....	17
Figura 3 – Séries dos radionuclídeos primordiais.	17
Figura 4 – Entrada de ^{222}Rn em edifícios.	20
Figura 5 – Mecanismos de transporte e liberação de radônio nos ambientes internos.....	22
Figura 6 – Estrutura básica da simulação via CFD.	25
Figura 7 – Estruturação das características físicas de fluxo em CFD.	26
Figura 8 – Etapas de solução de um caso CFD.	28
Figura 9 – Processo de solução do método dos volumes finitos.	30
Figura 10 – Modelos de turbulência associados ao recurso computacional.....	31
Figura 11 – Representação dos modelos de turbulência. a) DNS, (b) LES e (c) RANS.....	32
Figura 12 – Estruturação da metodologia.	35
Figura 13 – Sala de amostras do Departamento de Energia Nuclear - DEN/UFPE.....	36
Figura 14 – Posição dos dispositivos α Espec 222 na sala de amostras.....	37
Figura 15 – Etapas do caso de dispersão de ^{222}Rn no Ansys CFX.....	39
Figura 16 – Representação da região de estudo	40
Figura 17 – Malha do fluido na sala de amostras	41
Figura 18 – Parâmetro Aspect Ratio.....	42
Figura 19 – Parâmetro de ortogonalidade.....	42
Figura 20 – Representação das condições de contorno inseridos no modelo.....	44
Figura 21 – Detector AlphaGUARD e detalhes de funcionamento	47
Figura 22 – Arranjo experimental para determinação de dados para simulação.....	48
Figura 24 – CR-39 da Fonte 01 com aumento de 100x no microscópio.	50
Figura 25 – Relação entre a concentração das fontes ambientais e os limites regulatórios	52
Figura 26 – Distribuição do fluxo de temperatura para movimento do fluido	53
Figura 27 – Representação da temperatura na sala de amostras.....	54
Figura 28 – Distribuição horizontal da concentração de radônio na sala de amostras.....	55
Figura 29 – Dispersão do Rn gerado pelo dispositivo 01 na sala de amostras DEN/UFPE.....	56
Figura 30 – Contornos da dispersão do Rn na sala de amostras DEN/UFPE	57
Figura 31 – Relação entre a concentração de radônio no ar e os limites regulatórios.....	59
Figura 32 – Variação da concentração de ^{222}Rn ao longo do dia	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do radônio.....	19
Tabela 2 – Temperatura média da sala de amostras do RAE/DEN/UFPE.....	49
Tabela 3 – Concentração e taxa de exalação de radônio na sala de amostras com CR -39.....	51
Tabela 4 – Fluxo mássico de Rn na sala de amostras.....	52
Tabela 5 – Condições de contorno de temperatura inseridos no ANSYS CFX	53
Tabela 6 – Medidas experimentais de concentração do ²²² Rn com o AlphaGUARD.....	58
Tabela 7 – Concentração de Rn na sala de amostras (Bq.m ⁻³).....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	RADIOATIVIDADE AMBIENTAL	15
3.1.1	Radônio	18
3.1.2	Mecanismos de transporte de radônio	20
3.1.3	Medidas de radônio interno	23
3.2	DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	24
3.2.1	Etapas de solução de um caso CFD	25
3.2.1.1	Pré-processamento	25
3.2.1.2	Solver	27
3.2.1.3	Pós-processamento.....	28
3.3	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO	29
3.3.1	Método dos Volumes Finitos	30
3.4	MODELOS DE TURBULÊNCIA.....	30
3.5	APLICAÇÕES COM CFD NA AVALIAÇÃO DE RADÔNIO.....	32
4	METODOLOGIA	34
4.1	CENÁRIO DE MODELAGEM.....	35
4.2	DETERMINAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	36
4.3	SIMULAÇÃO CFD	38
4.3.1	Pré-processamento	39
4.3.1.1	Geometria da sala.....	39
4.3.1.2	Geração da malha.....	40
4.3.1.3	Condições de contorno.....	43

4.3.1.4	Modelagem do transporte do Rn.....	44
4.3.2	Solver.....	45
4.3.2.1	Modelo de turbulência – Abordagem RANS.....	45
4.3.3	Pós-processamento.....	46
4.4	COMPARAÇÃO DO MODELO.....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
5.1	DETERMINAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO CFD.....	49
5.2	SIMULAÇÃO CFD.....	52
5.3	COMPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO.....	57
6	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A radioatividade ambiental tem origem de fontes naturais e antropogênicas. A radioatividade natural apresenta maior contribuição, principalmente pela influência de fontes terrestres. Segundo os dados referenciados pela UNSCEAR (2008), aproximadamente 80% da exposição à radioatividade ambiental são provenientes das fontes naturais de radiação e 20% tem sua origem nas atividades antrópicas, que são produzidas pela ação humana, incluindo a radiação usada nas aplicações médicas, resíduos de testes nucleares e acidentes nucleares. Com isso, existe a preocupação com as radiações ionizantes, principalmente em decorrência dos radionuclídeos naturais, e suas interações com o ambiente e os seres vivos.

A radiação de origem natural é dividida em: radiação cósmica e fontes terrestres. A radiação cósmica é formada por partículas de alta energia, que resultam em reações nucleares e, ao atingir a atmosfera, formam os radionuclídeos cosmogênicos. Já os radionuclídeos de origem terrestre mais importantes são o ^{40}K o ^{87}Rb e os presentes nas duas séries radioativas naturais, sendo os precursores o ^{238}U e o ^{232}Th . Os radionuclídeos da série de decaimento do ^{235}U têm pouca influência na exposição à radiação por serem encontrados em baixa concentração na crosta terrestre e a baixa abundância do precursor da série.

No contexto da proteção radiológica vale destacar o ^{222}Rn , que é um radionuclídeo que possui meia vida-física e 3,82 dias, pertencente a da família dos gases nobres. É produzido a partir do decaimento do ^{226}Ra , da série radioativa do ^{238}U . Esse isótopo radioativo decai por emissão alfa e seus produtos de decaimento, ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po e ^{218}Po , são radionuclídeos de meia vida curta que podem ser depositados dos tecidos pulmonares. A (UNSCEAR, 2019) concluiu que o radônio inalado e sua progênie são cancerígenos para o pulmão.

O radônio exalado do solo e pode se infiltrar diretamente nos ambientes, através de rachaduras na parede e do piso das habitações, onde sua concentração pode se acumular, contribuindo para o aumento da exposição. Segundo as Noções Básicas de Proteção Radiológica, NRPB (2000), os indivíduos que respiram por toda a vida em uma residência onde o radônio está no nível de concentração de 200 Bq.m^{-3} acarreta um acréscimo no risco de 3 a 5% de adquirir câncer fatal de pulmão. Compreender sua distribuição é importante para prever as variações espaciais e temporais dos níveis que podem ser usados para cálculos de dose e pesquisa de controle de exposição. A concentração de radônio em ambientes fechados pode atingir níveis elevados dependendo da região, do clima, do fluxo de ar e da taxa de ventilação, afetando a qualidade do ar e gerando risco radiológico (Chauhan et al., 2014).

Com aporte em dados empíricos, alguns modelos matemáticos são desenvolvidos para estimar a concentração de radônio em ambientes fechados (Jelle et al., 2011). A prática de alguns experimentos que realizam a monitoração de radônio requer altos investimentos. Com isso, a utilização de simulações computacionais tem sido grande aliada para o crescimento e desenvolvimento da ciência, tendo em vista sua vasta capacidade e a precisão dos resultados que são analisados em menos tempo que em experimentos convencionais (Claus & Andersen, 2001)

A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, pela sigla em inglês) oferece a possibilidade de visualização da dispersão e dinâmica dos gases Tu et al. (2013). O CFD trata da solução das equações de escoamento de fluido, transferência de calor e demais fenômenos de transporte, geometrias e situações diversas.

Os estudos desenvolvidos para modelar a entrada do radônio em ambientes internos utilizando simulação CFD estão sendo ampliados e são essenciais para que essa ferramenta seja difundida no meio científico. Atualmente, a Dinâmica de Fluidos Computacional, assumiu uma posição de destaque na simulação de radônio nesses ambientes, passando a ser uma ferramenta poderosa e econômica para estudar e prever a distribuição desse gás radioativo (Lima et al., 2020; Chauhan & Chauhan, 2015; Contoh et al., 2019).

O presente estudo visa compreender, de forma pioneira no Brasil, o comportamento do radônio em ambiente interno com alto fundo radiológico. Foram realizados experimentos que junto ao desenvolvimento de um modelo computacional que utiliza CFD resultaram na estimativa da distribuição do ^{222}Rn no interior da sala de guarda de amostras do grupo de pesquisa em Radioecologia do Departamento de Energia Nuclear – DEN/UFPE.

2 OBJETIVOS

Os objetivos traçados para o desenvolvimento desse trabalho são definidos a seguir.

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir um modelo computacional via modelagem por Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para avaliação da distribuição do radônio em ambientes internos com alto fundo radiológico e condições experimentais padronizadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar experimentalmente a concentração média de radônio em ambiente interno com alta radioatividade de fundo, através de métodos ativos e passivos;
- ✓ Calcular a exalação do radônio e descendentes utilizando métodos ativos;
- ✓ Analisar a confiabilidade dos dados experimentais através de testes estatísticos;
- ✓ Construir a simulação da concentração de radônio na sala de amostras do Departamento de Energia Nuclear - DEN/UFPE usando o ANSYS CFX;
- ✓ Comparar e avaliar os resultados experimentais e de simulação.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo apresenta cinco seções que fundamentam esse trabalho. O primeiro versa sobre a radioatividade ambiental, a segunda trata sobre a introdução de Dinâmica de Fluidos Computacional. O terceiro aborda sobre as equações de conservação. O quarto e o quinto tratam, respectivamente, sobre os modelos de turbulência e aplicações de CFD com o uso do radônio.

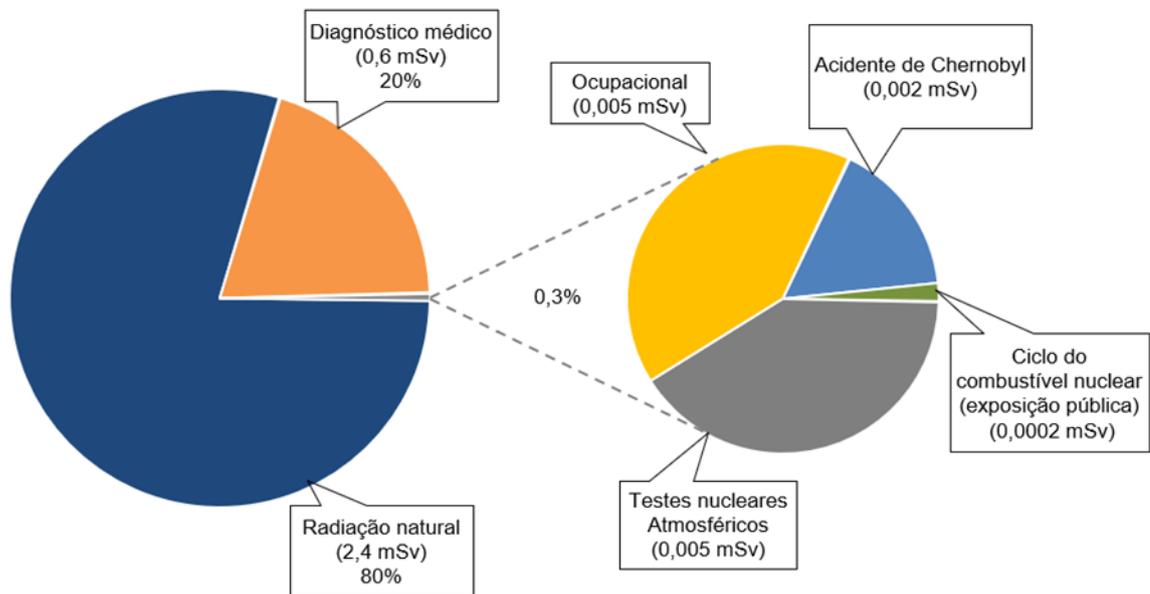
3.1 RADIOATIVIDADE AMBIENTAL

O meio ambiente e os seres vivos estão continuamente expostos à radiação gerada de diversas fontes. As fontes de radiação são subdivididas em naturais e artificiais ou antropogênicas.

As fontes naturais são aquelas que existem desde o período de formação da Terra (fontes terrestres) ou proveniente do espaço (fontes de radiação cósmica). De fato, não existem mecanismos para evitar a exposição à radiação natural, mas é possível elaborar estratégias que minimizem as doses recebidas pelos indivíduos. Fontes naturais de radiação podem ser encontradas nas rochas, nos solos, em alimentos e na água. As fontes antropogênicas ocorrem com a intervenção do homem, com diversas aplicações, entre elas na medicina e testes nucleares.

Em condições normais, a radiação proveniente de fontes naturais são as maiores contribuintes da dose média individual, representando $2,4 \text{ mSv.a}^{-1}$, como ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Dose individual média anual decorrente de fontes naturais e artificiais.

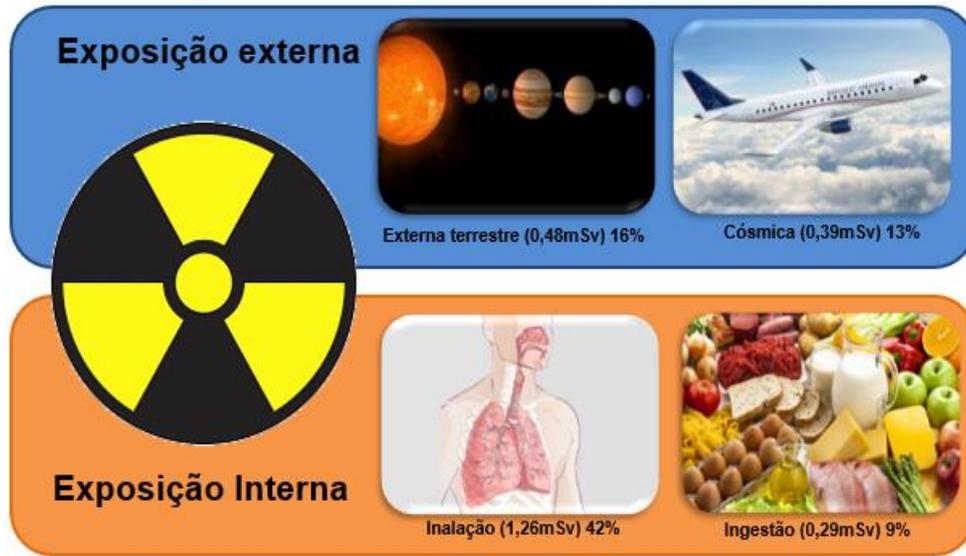


Fonte: Adaptado de Mazzilli et al. (2011).

Mesmo que todos os indivíduos estejam expostos à radiação natural, existem aqueles que recebem doses maiores. Essa variação de dose pode ser explicada pela região, levando em conta fatores como as características do solo, rocha, o clima, a altitude, entre outros parâmetros que influenciam nos índices de radiação natural. Em termos de doses efetivas recebidas através de fontes artificiais, tem-se no diagnóstico médico como a principal fonte de exposição, que representa uma média de $0,6 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ (Mazzilli et al. 2011).

As doses de radiação natural recebidas pelos seres vivos podem ser de forma externa, com a contribuição dos radionuclídeos terrestres e raios cósmicos, e interna, através da inalação e/ou ingestão. A UNSCEAR (2008) possui valores recomendados sobre a irradiação externa e interna aos indivíduos, conforme Figura 2. A maior parcela de contribuição na irradiação externa ao indivíduo é através dos radionuclídeos presentes em fontes terrestres, produzindo uma dose de $0,48 \text{ mSv}$, que representa 16% da radiação das fontes naturais. Já a inalação do radônio e descendentes representa a maior contribuição de toda radiação proveniente das fontes naturais, 42% ou $1,26 \text{ mSv}$, sendo, portanto, o meio de maior relevância para a contribuição nas doses internas ao indivíduo.

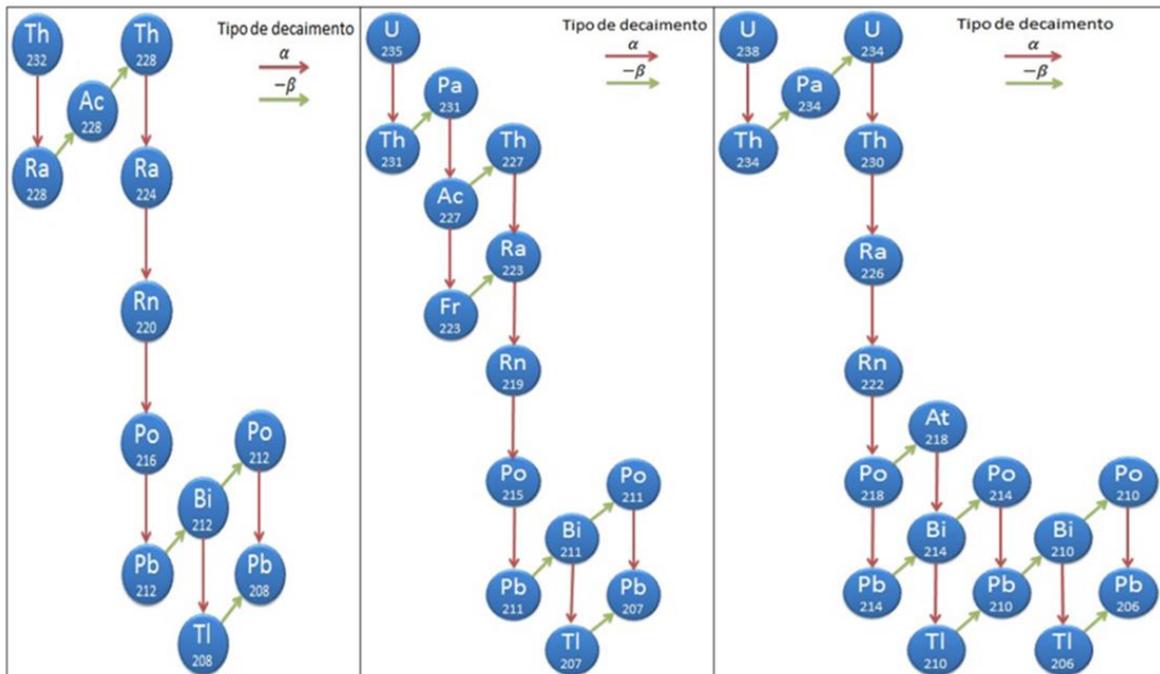
Figura 2 – Dose individual média anual decorrente de fontes naturais.



Fonte: Adaptado de UNSCEAR (2008).

Em se tratando dos radionuclídeos de origem terrestre, a maior contribuição na dose recebida pelos indivíduos é devido aos primordiais, que são radionuclídeos que possuem tempos de meia-vida próximos à idade da Terra. Dentre os quais se destacam as séries do ^{238}U e o ^{232}Th , conforme Figura 3, além dos elementos ^{40}K e ^{87}Rb .

Figura 3 – Séries dos radionuclídeos primordiais.



Fonte: Adaptado de IAEA (2013).

Nas três séries de decaimento ocorre a formação de radônio, um gás radioativo produzido a partir do decaimento do rádio.

Os próximos tópicos desse trabalho tratarão sobre a origem, características e mecanismos de transporte desse elemento, além dos fatores que influenciam sua concentração nos ambientes.

3.1.1 Radônio

O radônio (Rn) é um elemento químico localizado no grupo 18 da tabela periódica. É um gás nobre, quimicamente inerte em condições ambientes. Em temperaturas normais o Rn é um gás incolor. Quando resfriado abaixo de seu ponto de fusão de $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$, o Rn exibe uma fosforescência brilhante, que se torna amarela à medida que a temperatura diminui e vermelho-alaranjado a medida que a temperatura do ar aumenta. Em altas temperaturas, o Rn reage com F e Cl para formar haletos como RnF_2 , RnF_4 , RnF_6 e RnCl_4 . (DICK & JÖNASSON, 2000).

Esse radionuclídeo possui 61 isótopos e dentre eles existem três que fazem parte do decaimento radioativo natural, são eles: o ^{222}Rn (radônio), ^{220}Rn (torônio) e ^{219}Rn (actinônio), emissores alfa. Entre esses isótopos, o de maior relevância é o ^{222}Rn , que é originado a partir do decaimento do ^{226}Ra da série do ^{238}U , por apresentar maior abundância e tempo de meia-vida suficientemente longo para percorrer a matriz porosa e exalar para o ambiente, o que não acontece na mesma proporção com seus isótopos, já que possuem meias-vidas mais curtas, decaindo mais rápido para o polônio, permanecendo na matriz porosa.

Esse trabalho é dedicado ao isótopo ^{222}Rn , dessa forma, o termo “radônio” ao longo desse estudo se refere a esse radionuclídeo. O gás radônio possui densidade de $9,73\text{ g.L}^{-1}$ e meia-vida de 3,82 dias. A Tabela 1 apresenta algumas características físico-químicas desse elemento.

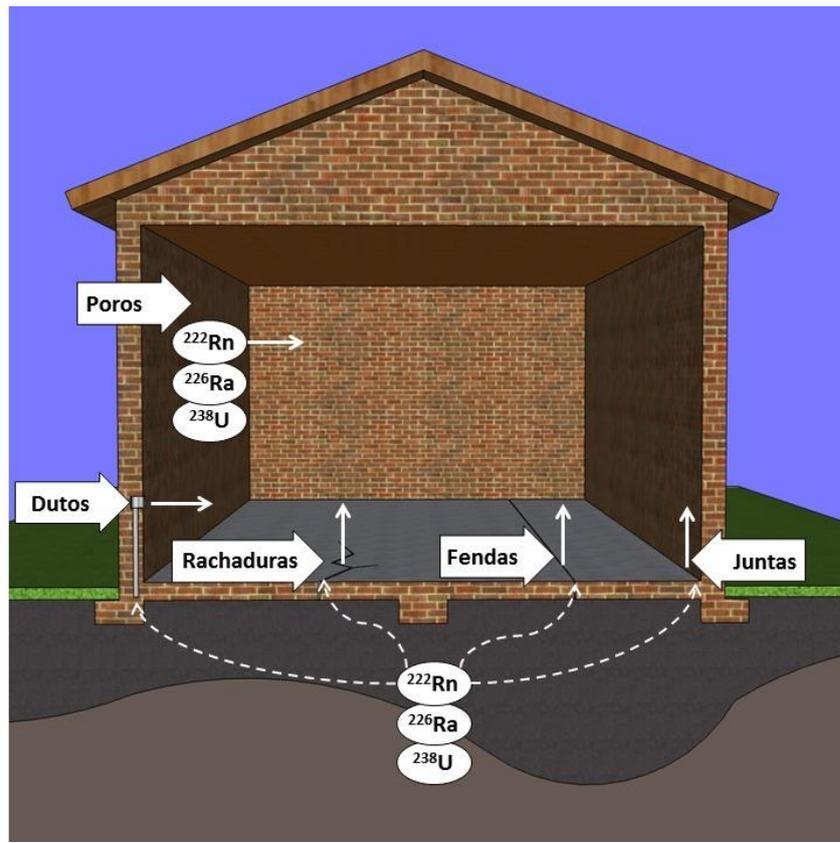
Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do radônio.

Parâmetro	VALOR	UNIDADE
Massa molar	222	kg.kmol ⁻¹
Densidade	9,73	kg.m ⁻³
Capacidade Térmica	93,55	W.k ⁻¹
Condutividade Térmica	3,6 x 10 ⁻³	W.m ⁻¹ .k ⁻¹
Viscosidade	2,445 x 10 ⁻⁵	kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
Constante de difusão na água	1 x 10 ⁻¹	cm ² .s ⁻¹

Fonte: Flores (2020).

O radônio e sua progênie são reconhecidos como os principais contribuidores para dose devido à radioatividade natural, sendo responsável por um pouco mais da metade de toda a exposição à radiação ionizante ao qual o ser humano está exposto (Santos, 2010). O risco em relação à saúde dos indivíduos está associado à inalação desse gás. Seus produtos de decaimento emitem partículas alfa e beta e podem ser alojados nos pulmões depositando energia nos tecidos, ocasionando alterações celulares. Embora as partículas alfa tenham pouco poder de penetração, elas são altamente ionizantes.

O radônio está presente no solo, rocha, água de abastecimento, e pode exalar para os interiores das edificações. Segundo IRD (2016), o principal risco à saúde se dá por meio da inalação do radônio proveniente de materiais de construção e infiltração pelo solo em ambientes internos. Em cidades com grande número de construções verticais, como prédios, a concentração do radônio em ambientes *indoor* se deve principalmente aos materiais de construção (Zhang et al. 2012). No ambiente interno, especialmente em espaços confinados em casas e outros edifícios onde a troca de ar não é permitida, o radônio e seus derivados podem ser depositados em níveis prejudiciais (Degu, 2021). Os níveis de concentração de radônio e o grau de exposição dos indivíduos aumenta em ambientes fechados. Na Figura 4 estão apresentadas as vias de entrada do radônio em ambientes internos.

Figura 4 – Entrada de ^{222}Rn em edifícios.

Fonte: Adaptado de UNEP (2016).

O solo é normalmente o principal responsável pela liberação de radônio nos ambientes. O radônio liberado através do rádio contido na matriz porosa se desloca até o meio externo através de fatores físicos e climáticos. Por ser um gás, ele pode se difundir em ambientes de convívio humano por meio de materiais de construção, solo e água de abastecimento, submetendo aos indivíduos à radioatividade (EPA, 2015). Quanto menos ventilada a moradia, maior a concentração de radônio no seu interior. Dessa forma, tem-se a ideia de que uma boa prática para minimizar a influência desse radionuclídeo nesses ambientes é projetar os imóveis de forma que haja trocas de ar com o meio externo, procedimento um pouco complicado em regiões de clima frio no inverno.

3.1.2 Mecanismos de transporte de radônio

De acordo com o Manual da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre radônio em ambientes internos (IRD, 2016), a compreensão das fontes e mecanismos de transporte do

radônio têm evoluído ao longo de várias décadas. A probabilidade de elementos de radônio contidos dentro de grãos atingirem a atmosfera é muito pequena, devido ao baixo coeficiente de difusão desse radionuclídeo. Entretanto, se estiverem localizados no espaço vazio entre os grãos, podem se difundir e exalar para a superfície. Os fenômenos de transporte de radônio são: emanção, difusão e exalação.

No solo, o coeficiente de emanção (f) é a fração de átomos de radônio gerados a partir de um grão mineral que escapam e se tornam livres. Esse parâmetro torna possível determinar outras características de um material relacionado ao radônio (Morawska e Phillips, 1993; Savidou et al., 1996). É definido como a razão entre a atividade do radônio liberado no material (A_1) e a atividade do rádio contido no material (A_0), conforme demonstrado na Equação 1.

$$f = A_1/A_0 \quad (1)$$

O transporte por difusão é caracterizado como o movimento do gás nos poros do material, sendo a taxa de transporte do gás por unidade de área (J_D) medida em $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. É determinada pela unidade de área do material e um intervalo de tempo, expressa pela Equação 2.

$$J_D = C_{Ra} \cdot \lambda_{Rn} \cdot f \cdot \rho \left[\frac{D_e}{(\lambda_{Rn} \cdot \varepsilon)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

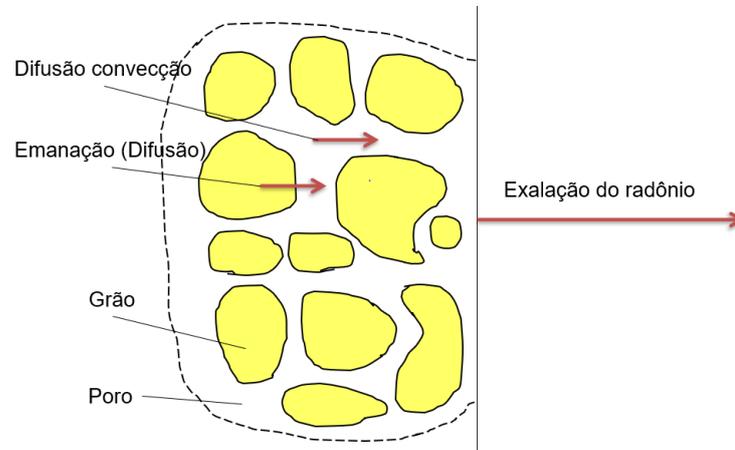
Onde C_{Ra} equivale à concentração de rádio no solo ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), λ_{Rn} à constante de decaimento do ^{222}Rn , f ao coeficiente de emanção, ρ à densidade do material ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), D_e ao coeficiente de transporte por difusão ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) e ε à porosidade do material.

Outro parâmetro importante é a taxa de exalação, medida em $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, que fornece a medida da liberação de radônio do meio interno para o meio externo de uma amostra. O gás é exalado continuamente a uma taxa que é determinada por fatores, tais como: condições meteorológicas (pressão barométrica, ventos, temperatura e umidade), concentração de ^{226}Ra nos solos ou rocha subjacente, densidade, porosidade e principalmente, pela permeabilidade (Lara, 2017).

Por ser um gás, o radônio pode ser facilmente transportado dentro dos poros de um material. O transporte por convecção é um fenômeno que ocorre quando um fluido qualquer no material atua como um transportador de radônio, realizando o movimento das massas de ar,

sendo influenciado, principalmente, pela diferença de pressão no ambiente. Os mecanismos de transporte citados acima estão representados na Figura 5.

Figura 5 – Mecanismos de transporte e liberação de radônio nos ambientes internos.



Fonte: Adaptado de Costa (2011).

A circulação de radônio nos ambientes internos também é influenciada pelo clima da região e pela ventilação nesses locais. Regiões de clima temperado costumam ser menos ventiladas que nas regiões de clima tropical, se tornando um fator para o aumento do Rn nesses locais.

A taxa de ventilação ou número de renovações de ar dos ambientes é o principal mecanismo de controle da concentração de radônio em ambientes internos, quer seja de convívio ocupacional ou em minas subterrâneas, de convívio social ou familiar (UNSCEAR, 2008). Akbari, Mahmoudi e Chauhan (2012b, 2014), relacionaram a concentração de radônio ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) com a taxa de ventilação através da Equação 3.

$$C = \frac{EA}{(\lambda_{Rn} + \lambda_v)V_{room}} \quad (3)$$

Onde E representa a taxa de exalação de radônio ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); A equivale à área da superfície (m^2); V_{room} o volume da sala (m^3); λ_{Rn} a constante de decaimento do ^{222}Rn (h^{-1}) e λ_v a taxa de ventilação (h^{-1}).

As taxas de exposição dependem do teor de urânio e tório presentes no solo e dos níveis de radioatividade dos materiais de construção utilizados. Outro aspecto para o aumento da concentração de radônio em ambiente interno é a umidade do local, Cozmuta (2003) mostrou que a taxa de exalação de superfície de radônio tem uma correlação direta com a umidade relativa na faixa de 30-70%. As taxas de liberação de radônio do concreto aumentam

linearmente com as taxas de umidade nesta faixa. No entanto, isso atinge um máximo em 70 a 80% de umidade, após os quais as taxas de transporte diminuem drasticamente (Cozmuta, Van der Graff, & de Meiter, 2003).

Os níveis de exposição podem alcançar valores significativos, especialmente quando o terreno ou os materiais de construção apresentam níveis altos de radioatividade. O isolamento térmico pode agravar ainda mais a situação (Mazzilli et al., 2011).

3.1.3 Medidas de radônio interno

Devido às suas propriedades químicas, a detecção do radônio é determinada com o uso de equipamentos específicos. Os níveis de radônio podem sofrer variações com o tempo, por isso, existe a preocupação com a saúde da população considerando a dispersão das concentrações de radônio nesses ambientes, apresentando níveis mais elevados que em ambientes externos (WHO, 2004; EPA, 2001).

O monitoramento dessas concentrações pode ser realizado através de detectores ativos e passivos. Dessa forma, se torna possível à realização de avaliações e, quando os limites estiverem superiores aos recomendados, segundo a UNSCEAR (2008), por exemplo, deve-se determinar medidas de intervenção para mitigação de radônio nesses ambientes.

Os dispositivos ativos precisam de energia elétrica e incluem aparelhos de monitoramento contínuo. Eles fazem a detecção e registro do radônio ou de seus núcleos filhos continuamente, geralmente com alto custo associado (Freudenrich e Brain, 2000). Esses dispositivos realizam medidas da concentração de radônio em um curto prazo, não sendo recomendadas tomadas de decisões em uma situação de risco radiológico já que as concentrações variam de acordo com o tempo. A Health Canada (2017) indica que qualquer teste de curto prazo deve ser seguido por uma medição de longo prazo. Podem ser citados como detectores ativos os monitores contínuos e os detectores de integração eletrônica.

Os dispositivos passivos são utilizados para medir a concentração de radônio e dos seus filhos. Alguns exemplos são: carvão ativado, detectores de cintilação líquida de carvão, detectores de trajetórias de partículas alfa, entre outros (Freudenrich e Brain, 2000). Esses dispositivos são equipamentos de medidas de longo prazo, que requerem maior tempo para a coleta dos resultados. A Health Canada (2017) não recomenda um teste de duração inferior a 1 mês, sendo recomendado um mínimo de 3 meses. Dentre esses detectores, são destacados os

Detectores de traços do estado sólido (SSNTD), detector de carvão ativado e câmara de ionização de eletreto.

Dentre os órgãos internacionais que regulamentam e controlam as exposições à radiação ionizante podem ser citados a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, pela sigla em inglês), Agência de Proteção Ambiental (EPA, pela sigla em inglês) e a Organização Mundial da Saúde (WHO, pela sigla em inglês). Que estabelecem, respectivamente, como limites permissíveis 200 Bq.m^{-3} , 148 Bq.m^{-3} e 100 Bq.m^{-3} . A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão de regulamentação nacional, se baseia nestes órgãos anteriormente mencionados, para definição dos limites máximos permissíveis no Brasil, que assim como definido pela ICRP (2014), estabelece o limite de 300 Bq.m^{-3} , que equivale a uma dose em residências de 10 mSv por ano.

3.2 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é uma ferramenta de simulação multidisciplinar que surgiu com a integração das disciplinas de mecânica dos fluidos, matemática e ciência da computação (Jiyuan et al., 2019). Essa ferramenta é dedicada à compreensão de problemas relacionados ao movimento dos fluidos, que podem incluir transferência de calor, reações químicas, entre outros. Na modelagem via CFD, três leis fundamentais da física são resolvidas para compreensão do movimento do fluido, são elas: a Lei da Conservação da Massa, a Primeira Lei da Termodinâmica e a Conservação da quantidade de Movimento.

O método de simulação CFD tem sido implementado em diversas áreas em engenharia, metalurgia, segurança nuclear, também como ferramenta de pesquisa e educacional (Jiyuan et al., 2019). Dentre algumas de suas vantagens podem ser citadas a redução de prazos e custos associados com produção e design, pois, com o desenvolvimento dos computadores, surgiu a possibilidade de simular fluxos a que a experimentação não pode ser realizada ou a abordagem analítica não pode ser aplicada.

A ferramenta CFD pode ser executável em softwares comerciais e livres, o primeiro, resultado de muitos investimentos, com uma interface gráfica mais elaborada e códigos fechados cujas licenças possuem um custo elevado. Já o segundo apresenta tecnologia mais flexível e códigos abertos, que permitem ao usuário personalizar os códigos. Dentre os programas comerciais, os mais utilizados são ANSYS-CFX, ANSYS- FLUENT, STAR-CCM+

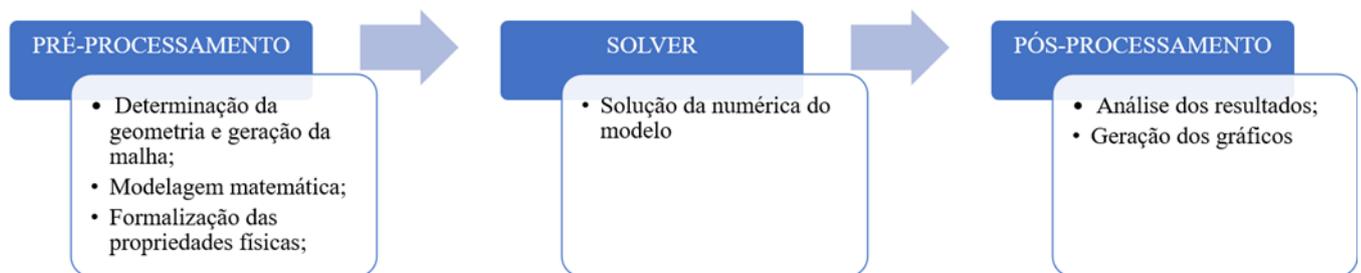
e FLOW3D. Como programas livres podem ser citados o SU2, Palabos e OpenFOAM. Dentre os programas livres, o mais utilizado é o OpenFOAM, (Fiates, 2015) .

Alguns exemplos de trabalhos em CFD são o de (Klein et al., 2018), onde foi realizado o desenvolvimento e aplicação de modelos de turbulência em duas escalas temporais para fluxos fora de equilíbrio com o uso de CFD. Fiates (2015) desenvolveu estudos para determinar uma metodologia de análise de dispersão do gás inflamável usando simulação CFD. Na área de biomecânica, Bert et. al (2010) realizaram análise da aerodinâmica de ciclistas via CFD. Para trabalhos publicados na área nuclear com o uso do radônio (^{222}Rn), podem ser destacados os trabalhos de (Chauhan et al., 2014) que estimou via CFD, parâmetros que influenciam nos níveis desse radionuclídeo nos ambientes. (Rabi & Oufni, 2017) puderam simular a dispersão de ^{222}Rn em residências atrelado ao uso de métodos passivos e ativos.

Outras pesquisas focam na comparação dos resultados obtidos da concentração de radônio usando simulação CFD e nas taxas de exalação com medições experimentais (Chauhan et al., 2014; Kumar et al., 2014; Kumar & Chauhan, 2015). No entanto, poucos trabalhos (Akbari & Mahmoudi, 2012) explicam como os fatores físicos e ambientais afetam a concentração de radônio.

Para a realização da análise do comportamento de um fluido via CFD é necessário seguir as etapas descritas na estrutura apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura básica da simulação via CFD.



Fonte: A autora (2022)

3.2.1 Etapas de solução de um caso CFD

A seguir estão descritas as etapas de solução de um caso CFD.

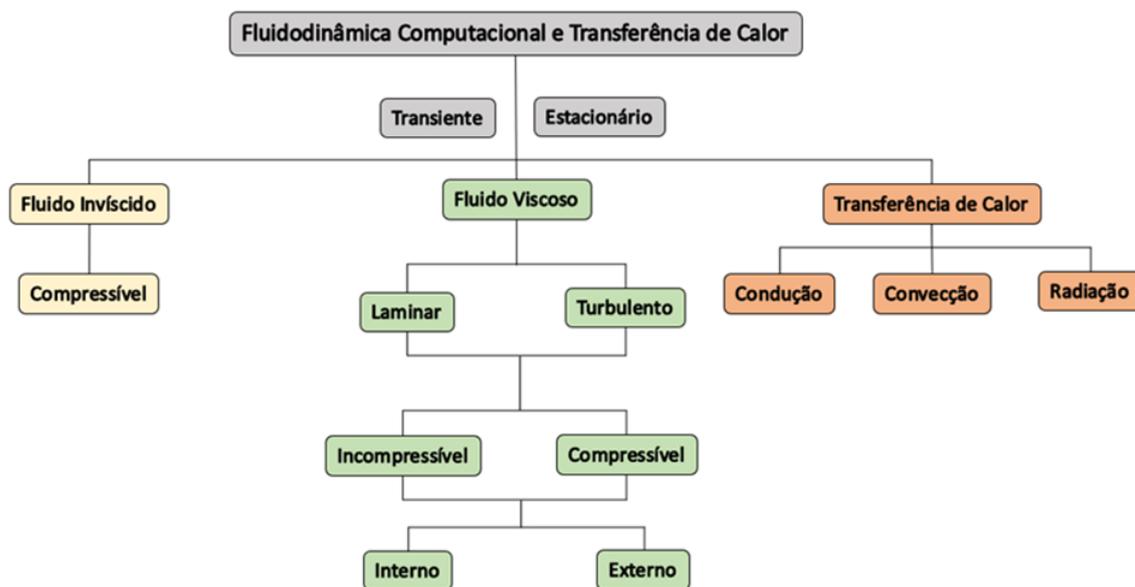
3.2.1.1 Pré-processamento

O pré-processamento é a etapa inicial da simulação CFD. Na qual é construído a geometria da região do escoamento do fluido através de programas de desenho, como os CAD, que são compatíveis com os softwares comerciais e livres.

A etapa subsequente à construção da geometria é a geração da malha, que nada mais é que a discretização da geometria em volumes de controle onde acontece a solução das equações de CFD. Existem muitos programas utilizados para criação das malhas, alguns deles são cfMesh, blockmesh/snappyHexMesh, ICEMCFD, dentre outros.

A modelagem do problema físico e determinação das condições de contorno são determinadas ainda na primeira fase de pré-processamento, logo após a geração da malha. A apresentação das equações de conservação de massa, momento, energia, entre outras a serem utilizadas na simulação via CFD, serão descritas no processo de modelagem matemática da simulação. Nessa fase ocorre a determinação das características, de acordo com o caso estudado, que estão caracterizadas no fluxograma representado na Figura 7.

Figura 7 – Estruturação das características físicas de fluxo em CFD.



Fonte: Adaptado de Jiyuan (2013).

Um fluxo em regime estacionário ou transiente está relacionado à dependência temporal, assim sendo, fluido em regime estacionário é caracterizado pelo escoamento onde as propriedades do fluido não se alteram com o tempo. Logo, o fluxo de um fluido em regime transiente tem suas propriedades variando com o passar do tempo.

De acordo com o apresentado na figura acima, um fluido possui determinadas características que são importantes para o estudo do comportamento do mesmo no caso de CFD. A viscosidade é um dos atributos dos fluidos que está associada à resistência que um fluido encontra para se mover, ou seja, escoar. Fluidos invíscidos são considerados ideais, pois a

velocidade do escoamento é constante e, por isso, tornam a tensão de cisalhamento nula. Em contrapartida, fluidos viscosos ou reais, apresentam forças de cisalhamento que estão associadas à variação da velocidade.

Fluidos viscosos apresentam distinções quanto ao tipo de escoamento, que pode ser laminar ou turbulento. Philip J. Pritchard (2010) um fluxo laminar é aquele em que as partículas de fluido se movem em camadas lisas, ou lâminas; um fluxo turbulento é aquele em que as partículas de fluido se misturam rapidamente à medida que se movem devido a flutuações de velocidade tridimensionais aleatórias.

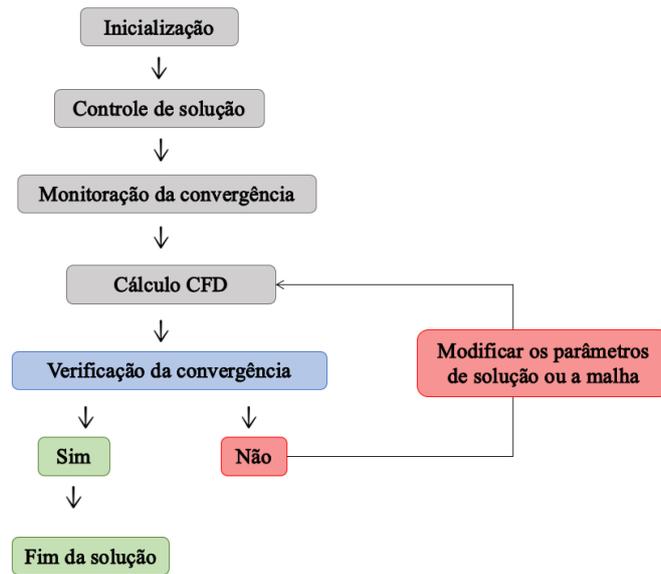
Brunetti (2012) Em termos da compressibilidade, se a densidade do fluido é constante, o fluido é considerado incompressível, isto quer dizer que nem a massa nem o volume do fluido podem alterar-se ao modificar a pressão; ou compressível significando que a densidade do fluido muda com a variação da pressão. Ainda, o escoamento de um fluido pode ser considerado interno quando está envolvido por superfícies sólidas ou externo, quando o fluido envolve uma superfície sólida.

Cengel, Y.A. (2002) No aspecto dos modos da transferência de calor, caso a transferência ocorra da interação entre as moléculas, denomina-se condução; caso seja a transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido, chama-se de convecção e por fim, a transferência de calor é chamada de radiação quando a energia é irradiada através de fótons.

3.2.1.2 Solver

Para a solução numérica do modelo de acordo com o problema físico são descritas três etapas distintas: Inicialização, controle de solução e monitoração da convergência. As etapas da fase solver estão detalhadas na Figura 8.

Figura 8 – Etapas de solução de um caso CFD.



Fonte: Adaptado de Jiyuan (2013)

Na primeira etapa são determinadas as condições iniciais e de contorno do fluxo. A escolha dessas condições influencia na necessidade de esforços computacionais de maior ou menor demanda, levando ou não à convergência.

Na etapa de controle de solução é especificado o parâmetro de discretização e o solver utilizado para a solução numérica. As técnicas de solução numéricas utilizadas na simulação CFD são: Método dos Volumes Finitos (MVF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método das Diferenças Finitas (MDF).

O terceiro momento constitui a monitoração da convergência. Essa etapa está baseada na análise do cálculo de CFD e a verificação para convergência, ou seja, se o processo numérico adotado é solução para o caso estudado e se a malha utilizada é adequada.

3.2.1.3 Pós-processamento

A terceira etapa consiste em observar e analisar os resultados na simulação através da geração de imagens gráficas de boa visualização que permitam a discussão quantitativa dos resultados físicos do caso de estudo. Os gráficos XY são principalmente gráficos bidimensionais que representam a variação de uma variável de interesse em comparação com outra variável independente.

3.3 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

Em CFD, as equações governantes são diferenciais parciais, conhecidas como as equações de Navier Stokes, que não possuem solução analítica direta, mas podem ser resolvidas numericamente através de técnicas de discretização. Dentre as técnicas de solução das equações de CFD, a técnica dos volumes finitos é a mais utilizada. A seguir, uma breve apresentação destas leis, utilizando a nomenclatura de acordo com ANSYS (2018a, 2018b).

- Equação da continuidade: Conservação da massa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (4)$$

Onde ρ equivale à densidade, U representa a velocidade do escoamento do fluido e t equivale ao tempo. Em regime estacionário, o termo temporal é nulo.

- Conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (5)$$

Sendo τ o tensor viscoso; dado por $\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U)$; μ : viscosidade dinâmica; p : pressão; S_M : um termo fonte.

- Conservação da energia total

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (6)$$

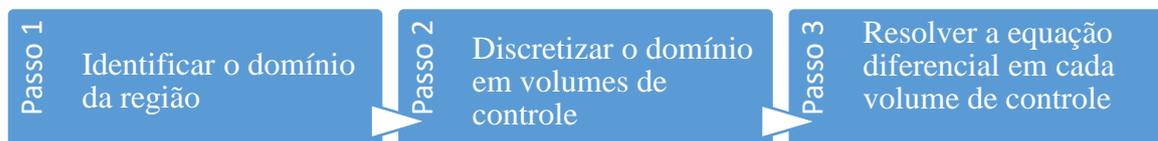
Onde h_{tot} representa a entalpia total e está relacionada à entalpia estática, dada por $h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$. O termo $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ representa o trabalho devido às tensões viscosas e é chamado de termo de trabalho viscoso. Isso modela o aquecimento interno por viscosidade no fluido e é desprezível na maioria dos fluxos. O termo $U \cdot S_M$ representa o trabalho devido às fontes externas de momento e geralmente é negligenciado e S_E é o termo fonte de calor.

3.3.1 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos (MVF) é o mais aplicado para o estudo de escoamento de fluidos usando CFD, porque mantém a conservação das propriedades de governo dentro do volume de controle e é também bastante difundido em diversas áreas do conhecimento. (Maliska, 1995) diz que existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas do MVF que são equivalentes. A primeira é a realização de balanço da propriedade em questão de volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é integrá-la sobre um volume elementar no espaço e no tempo.

A segunda maneira determinada por (Maliska, 1995) consiste em um método numérico baseado na solução das equações diferenciais parciais das leis da conservação. Este método funciona a partir da identificação e discretização ou divisão do domínio de simulação onde acontece o fenômeno físico em pequenos elementos, chamados de volumes de controle e resulta em valores aproximados das equações de governo do problema estudado. O processo de solução está esquematizado na Figura 9.

Figura 9 – Processo de solução do método dos volumes finitos.



Fonte: A autora (2022)

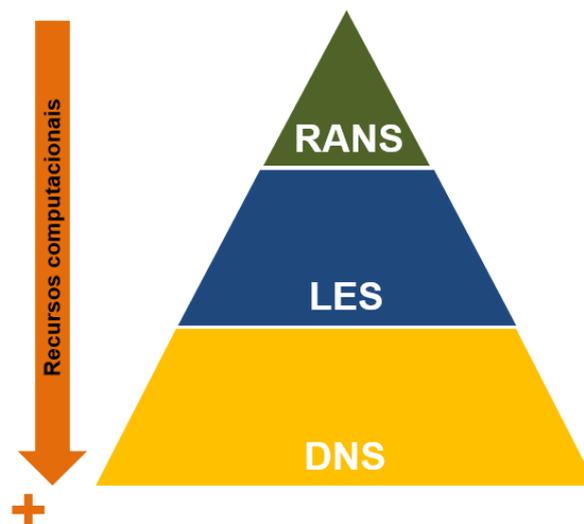
Identificar o domínio da região simulada é o mesmo que determinar os limites dimensionais do sólido onde o estudo do fluxo será realizado. Para a discretização do domínio identificado em volumes de controle é necessário dividir toda essa região em pequenos elementos, localizando o centro da variável que será calculada. Em seguida, serão realizadas as integrações nas equações governantes. É importante ressaltar que em caso de fluxo transiente, deve-se acrescentar o termo temporal.

3.4 MODELOS DE TURBULÊNCIA

Fluxos turbulentos são altamente instáveis, tridimensionais e flutuam em uma ampla gama de escalas de comprimento e tempo. Atualmente a solução das equações de governo de um fluido em CFD, conhecidas como equações de Navier Stokes, não é possível com os

recursos computacionais disponíveis de forma direta, portanto, sendo necessária a implementação de modelos de turbulência de acordo com as escalas de comprimento. As abordagens para modelar a turbulência computacionalmente são: a Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation - DNS), as Equações Médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS) e a Simulação de Grandes Escalas (Large Eddy Simulation - LES). De acordo com a estrutura do caso turbulento em CFD, existe uma estratégia de solução baseada na sua necessidade computacional, como representado na Figura 10.

Figura 10 – Modelos de turbulência associados ao recurso computacional.

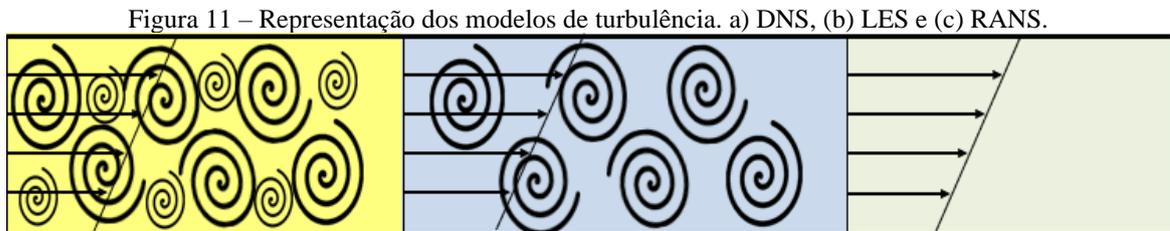


Fonte: A autora (2022)

Dentre os modelos, o DNS é o que demanda mais custos computacionais, pois utiliza uma malha extremamente fina onde todos os movimentos contidos no fluxo são resolvidos. (Ferziger e PeriC, 2001) essa é a abordagem mais precisa para a simulação de turbulência é resolver as equações de Navier Stokes sem fazer médias ou aproximações além das discretizações numéricas cujos erros podem ser estimados e controlados. Nesse modelo, as equações de Navier Stokes são resolvidas sem o uso de aproximações que não sejam discretizações numéricas cujos erros podem ser estimados e controlados.

Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (2007) O modelo LES para regimes transientes usa uma malha fina o suficiente para captar grandes vórtices que transportam energia e quantidade de movimento e é capaz de filtrar vórtices menores, em que é necessária a modelagem para levar em conta tais vórtices e, também, requer grande capacidade computacional.

No modelo RANS são realizados cálculos médios de toda a instabilidade, ou seja, essa instabilidade é considerada parte da turbulência. Nas médias, a não linearidade das equações de Navier-Stokes gera termos que devem ser modelados, os chamados de tensores de Reynolds. Esses modelos estão representados na Figura 11.



Fonte: Adaptado de Fiates (2015).

Para realização deste trabalho foi utilizado a abordagem RANS, devido ao baixo recurso computacional em comparação aos DNS e LES.

3.5 APLICAÇÕES COM CFD NA AVALIAÇÃO DE RADÔNIO

As vantagens de utilizar simulação CFD no estudo do escoamento de fluidos já foram discutidas nesse trabalho. Apesar de sua vasta aplicabilidade computacional, os estudos sobre os níveis de concentração de radônio via modelagem CFD são bastante recentes, alguns apresentados nesta pesquisa. De modo que esta seção será destinada à análise do que já se tem na literatura dentro dessa temática, na busca para o melhor desenvolvimento desse estudo.

No estudo de Akbari e Mahmoudi (2012) foi utilizado o FLUENT CFD para simular a entrada do radônio e os efeitos das várias taxas de mudança de ar, temperaturas, umidades relativas e diferença de pressões. O modelo 3D selecionado foi: transporte de espécies, pressão e estado estacionário, turbulência $k-\epsilon$, e o algoritmo SIMPLE. Ainda neste trabalho, para medição da concentração de radônio foram utilizados métodos ativos e passivos como o medidor de radônio contínuo (CRM, pelas siglas em inglês) e o detector de trilha alfa (ATD, pelas siglas em inglês). As medidas foram realizadas na primavera e no inverno, com erro de medição de $\pm 10\%$. Em suma, os gráficos de contorno da concentração de radônio levando em consideração os parâmetros de taxa de variação da ventilação, temperatura e diferença de pressão, nesta ordem. Akbari e Mahmoudi (2012) concluíram que os resultados são sustentados pela literatura quando inferem que as concentrações de radônio no ambiente interno são afetadas pela temperatura e a umidade. A verificação do modelo e seu desempenho indicam que a entrada de radônio na residência e os efeitos da temperatura e a umidade foram bem

definidas fisicamente e numericamente. O desempenho e a sensibilidade do modelo foram confirmados pela variação dos parâmetros de entrada e das condições de contorno. O valor da taxa de fluxo de massa de radônio no ar na saída afetou os padrões de sua distribuição internamente, tanto qualitativa quanto quantitativamente. Discrepâncias foram encontradas entre a simulação CFD, os cálculos numéricos e os dados de medição. Estes resultaram na representação insuficientemente detalhada de condições de contorno e imprecisões dos dados medidos devido ao curto período de medição.

Na mesma linha de trabalho, Chauhan et al. (2014) em sua pesquisa utilizaram como parâmetros de entrada para simulação o volume da sala, sendo que a estrutura do domínio é o único termo fonte de radônio; taxa de ventilação (λ_v); área de ventilação e velocidade de entrada (v). Os resultados apresentados por Chauhan et al. (2014) mostram a distribuição horizontal da concentração de radônio em ambientes internos, usando a modelagem CFD, a distribuição espacial do radônio na sala foi simulado para as condições da sala de teste concluiu que a distribuição de radônio não era uniforme devido à diferença no fluxo de fontes diferentes em condições de não-mistura.

Rabi e Oufni (2017) indicam que a concentração de radônio depende da taxa de ventilação, temperatura interna e níveis de umidade.

Em trabalhos mais recentes, Flores et. al (2020) determinaram que a concentração de radônio dentro de uma sala pode depender de vários fatores. Também perceberam a influência das dimensões da sala, pois se a quantidade de ar que entra no espaço permanece constante, as dimensões da sala serão um fator que permite determinar se o local poderia ser um espaço seguro do ponto de vista radiológico. Na Figura 15, esses autores constataram que à medida que o volume da sala aumenta, o gás radônio é mitigado mais rapidamente e, portanto, a sala tem níveis de concentração mais baixos embora haja um baixo fluxo de ar.

Através da análise destes trabalhos é notória a importância da simulação CFD para o estudo da concentração de radônio em ambientes fechados. De modo que com determinados parâmetros seja possível prever inúmeras situações e estimar ambientes onde possa existir risco radiológico.

4 METODOLOGIA

O estudo está fundamentado na construção de uma simulação via dinâmica de fluidos computacional para estimar a concentração de ^{222}Rn da sala de guarda de amostras do Departamento de Energia Nuclear - DEN da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

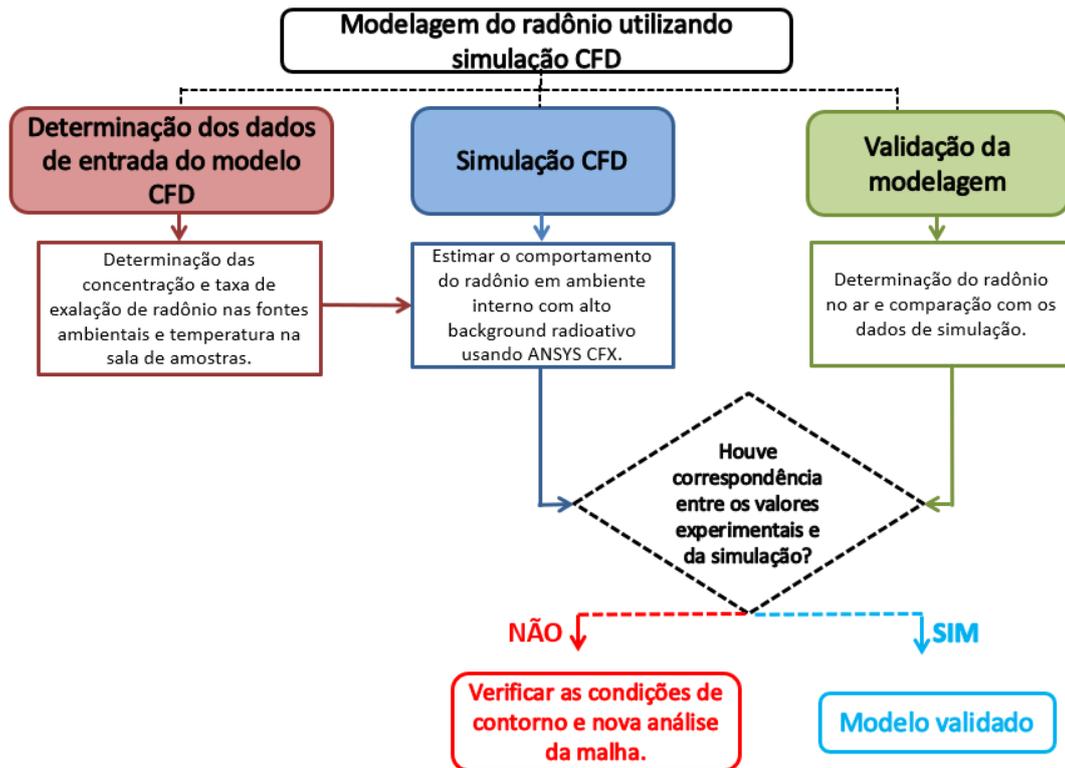
Nesta sala estão distribuídas amostras radioativas ambientais coletadas de locais com alta radioatividade natural e que foram utilizadas em trabalhos realizados pelo grupo de Radioecologia (era) do DEN da UFPE. Essa condição torna a sala um ambiente com alto *background* radioativo.

A metodologia foi realizada em três etapas. A primeira etapa foi experimental, com o objetivo de determinar os parâmetros de entrada do modelo CFD, a saber: concentração de radônio, taxa de exalação, a partir de metodologia passiva, nas fontes radioativas ambientais e temperatura das paredes frontal, traseira, porta e janela. Os dados obtidos na primeira etapa foram inseridos na segunda etapa, com simulação CFD realizada fazendo uso do software ANSYS CFX, objetivando estimar o comportamento do radônio no ambiente interno.

Após a conclusão da simulação, uma nova etapa experimental foi executada para determinar a concentração de radônio por método de detecção ativo, a fim de comparar com a simulação, sendo esta a última etapa da pesquisa.

A Figura 12 apresenta o fluxograma com o arranjo metodológico usado, para melhor visualização das etapas de realização desta pesquisa.

Figura 12 – Estruturação da metodologia.

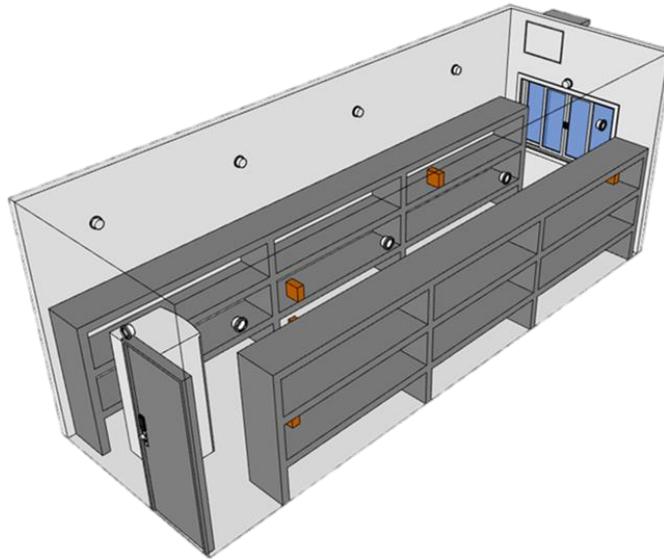


Fonte: Fonte: A autora (2022)

4.1 CENÁRIO DE MODELAGEM

O cenário de modelagem corresponde à sala de amostras do DEN, cujas características estruturais são: dimensão de 7,4 m x 2,3 m x 3 m, uma porta de 2,2 m x 0,8 m e uma janela de 1,0 m x 1,5 m, posicionada a 1 m do piso. A sala possui prateleiras de concreto nas laterais, onde estão distribuídos fontes radioativas ambientais e uma geladeira desativada com as medidas (66 cm x 150cm x 60cm). O fluido se movimenta por convecção natural, no qual o movimento do fluido é causado por forças de empuxo que são induzidas por diferenças de densidade devido à variação de temperatura (Cengel, Y.A., 2002). A Figura 13 mostra a representação da sala de amostras.

Figura 13 – Sala de amostras do Departamento de Energia Nuclear - DEN/UFPE



Fonte: A autora (2022).

4.2 DETERMINAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO

Nesta etapa foram determinadas a temperatura, a concentração e taxa de exalação do radônio, sendo esses os parâmetros de entrada para simulação no ANSYS CFX.

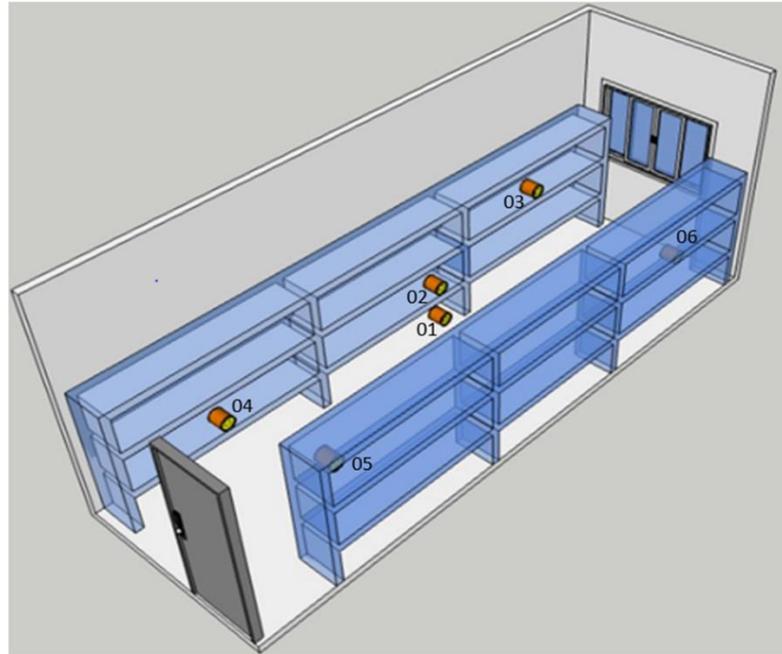
Como a sala de amostras passa mais tempo fechada, salvo para o acondicionamento de materiais coletados em campo ou retiradas das mesmas, a fim de simplificar a simulação, considerou-se que o movimento do radônio corresponde à diferença entre temperaturas das paredes frontal e traseira, esta última recebe calor pela irradiação solar. Com isso, as paredes laterais foram consideradas adiabáticas. Para a medição da temperatura dessas superfícies foi utilizado um termômetro infravermelho SCAN TEMP, com escala de temperatura de -60°C a $+500^{\circ}\text{C}$ e precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Para medir o impacto causado devido às fontes radioativas ambientais emissoras de ^{222}Rn na sala de amostras, foram instalados seis dispositivos de detecção passiva, α Espec-222 (Santos et al., 2021), que utiliza Detector de Traços Nucleares do Estado Sólido (SSNTD, pelas siglas em inglês), que mensura a concentração de radônio no ambiente.

Os dosímetros foram posicionados o mais próximo possível das fontes, de forma que cobrissem toda a região de interação alfa do dispositivo. Os dados obtidos pelo detector foram assumidos como valores de concentração das fontes, acumulados ao longo do período de exposição do detector. Essa instrumentação realizou medidas no período de um ano, levando

em consideração fatores como, ventilação, umidade e sazonalidade. A posição dos dosímetros está representada no esquema da Figura 14.

Figura 14 – Posição dos dispositivos α Espec 222 na sala de amostras.



Fonte: A autora (2022)

Após a retirada dos dispositivos, o processo de análise do material detector foi realizado seguindo o método utilizado por Santos et al. (2021), fazendo uso da infraestrutura do Laboratório de Radioecologia e Controle Ambiental (LARCA) do DEN - UFPE.

Os CR-39 sofreram um ataque químico com NaOH à 6,25 M, temperatura média de 70°C, durante um período de 6 horas. Na sequência, os polímeros foram lavados em água deionizada seguido por uma solução de CH₃COOH à 5% v/v e água deionizada novamente, nessa ordem, permitindo que o processo de revelação fosse interrompido.

Após a secagem dos dispositivos, foi realizada a contagem dos traços com a utilização do microscópio óptico do grupo de Radioecologia do DEN/UFPE, da marca Leica Microsystems®, modelo ICC50E® com iluminação LED. Para a visualização dos traços foi utilizada a objetiva de 10x, que permite aumento da imagem de até 100x. A captura das imagens foi realizada com um sistema acoplado ao microscópio, que é composto de uma câmera com alto desempenho da mesma marca e modelo, sendo realizadas a captura de 20 campos aleatórios de cada CR-39. As imagens foram armazenadas com auxílio do software Leica LAS EZ®.

Após as capturas dos campos, foram utilizados dois programas gratuitos, o primeiro para processamento das imagens, neste caso o software Digital Image Processing (DIP), desenvolvido pelo grupo de Dosimetria Numérica, cujo objetivo é o agrupamento das imagens para posterior análise no segundo programa, o software ImageJ, que foi utilizado para a contagem dos traços nucleares.

A concentração de radônio (C) em Bq.m^{-3} , foi calculada a partir da Equação 7, por meio da densidade dos traços obtidos na superfície do detector exposto, calculada a partir da relação entre o número de traços (N_t) e a área (A), em cm^{-2} , do CR-39 exposto em traços.cm^{-2} , do fator de calibração (k) em traços.cm^{-2} por $\text{Bq.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$ e do tempo em que ficou exposto (t) em dias.

$$C = \frac{N_t}{A.k.t} \quad (7)$$

Os processos de captura de imagem e contagem de traços foram realizados em duplicata e, ao final do processo, calculado a média para garantir a confiabilidade dos dados.

Para modelagem do estudo de caso, foi necessária a determinação da taxa de exalação do ^{222}Rn a partir da concentração. Para tanto, foi utilizada a Equação 8 escrita por Oufni (2003), que calcula a taxa de exalação do radônio a partir de um sistema de detecção passivo.

$$E = \frac{A_{Rn} V \lambda}{A \left[T + \frac{1}{\lambda(e^{-\lambda T} - 1)} \right]} \quad (8)$$

Onde E é a taxa de exalação do radônio ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$); A_{Rn} é a concentração do radônio (Bq.m^{-3}); V (m^3) é o volume da câmara que está contida ao dispositivo; λ é a constante de decaimento do radônio (h^{-1}); A é a área da superfície de detecção do CR-39 (m^2) e T é o tempo de exposição do detector (h).

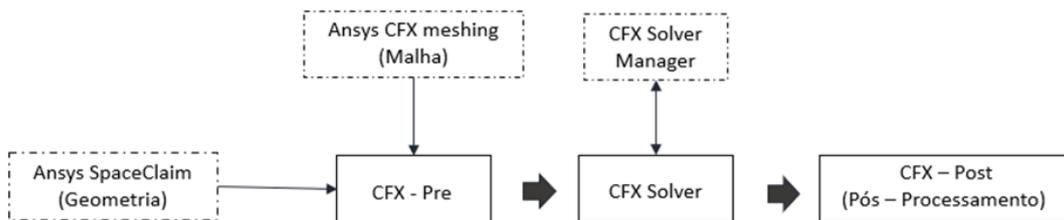
4.3 SIMULAÇÃO CFD

Nesta secção será apresentada a metodologia descrita para realização da modelagem do caso de dispersão do Rn na sala de amostras. O modelo computacional foi simulado usando o software ANSYS CFX, que é um produto da Ansys Inc, atual fornecedora dos pacotes de CFD de grande robustez, que possui uma interface gráfica bastante intuitiva.

Combina um solver avançado com poderosos recursos de pré, solver e pós-processamento, além de interfaces com outras linguagens de programação sob a forma de

interações com sub-rotinas ou pacotes externos. Na Figura 15 estão apresentadas as etapas de simulação usando o ANSYS CFX.

Figura 15 – Etapas do caso de dispersão de ^{222}Rn no Ansys CFX



Fonte: A autora (2022)

4.3.1 Pré-processamento

Esta etapa foi subdividida em fases, partindo da construção do domínio computacional, geração da malha até a definição das condições de contorno, sendo fundamental para a apresentação de resultados confiáveis e mais próximos da realidade.

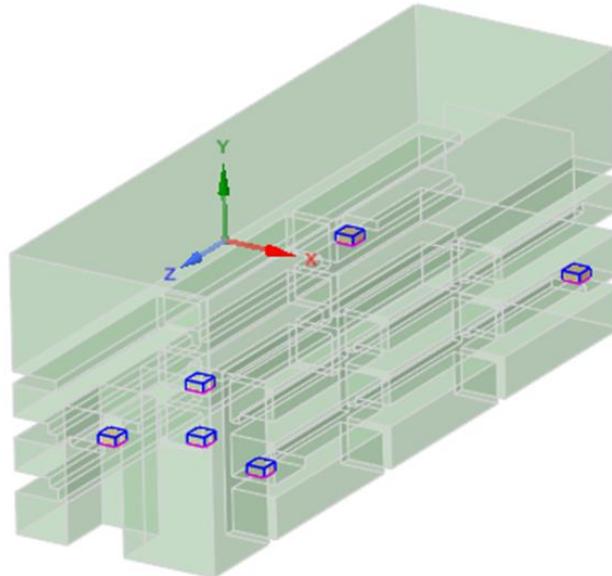
4.3.1.1 Geometria da sala

A representação geométrica da sala de amostras no Ansys CFX foi realizada com a utilização da ferramenta Ansys SpaceClaim. Essa ferramenta de desenho importa a maioria dos formatos CAD que existem no mercado, além de fornecer um design flexível para a preparação das geometrias de simulação.

Para a realização da simulação é importante que a geometria seja o mais simplificada possível, de modo a negligenciar detalhes geométricos que possuem pouco impacto na física do problema a estudar e, também, ausentar dificuldades na geração da malha. No Ansys SpaceClaim foi construído a região de fluido que ocupa a sala. Com isso, a região ocupada pela geladeira, as prateleiras, bem como a aproximação da porta à parede lateral direita foram desconsideradas, pois nessas regiões não há fluxo do radônio, o que permitiu a simplificação do domínio computacional. Na geometria foram inseridos blocos para representar as fontes ambientais, que, posteriormente foram configuradas no ANSYS CFX-Pre como condições

iniciais de Rn na sala. A Figura 16 traz a representação da geometria da sala com as regiões das fontes.

Figura 16 – Representação da região de estudo



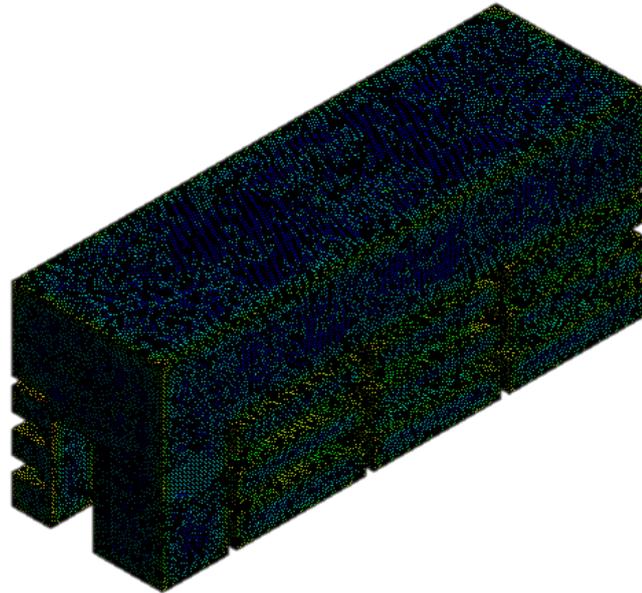
Fonte: A autora (2022).

4.3.1.2 Geração da malha

A próxima etapa da modelagem foi a construção da malha de todos os componentes do modelo geométrico. Na simulação CFD, a construção da malha é um dos processos que demanda maior tempo e um dos mais importantes para a aquisição de bons resultados. Em cada elemento de malha, chamado de volume de controle, são resolvidas as equações do CFD, ou seja, a precisão da solução e a independência dos resultados obtidos estão associadas a uma boa qualidade de malha.

No Ansys CFX, esta etapa foi executada pelo módulo Ansys Meshing, inserido dentro da plataforma ANSYS Workbench. O procedimento foi realizado utilizando o modelo de turbulência $\kappa-\epsilon$, o qual apresenta soluções mais acuradas (ou precisas) em regiões próximas às superfícies. Dessa forma foi utilizado o refinamento por proximidade das bordas, gerando uma malha com 1.511.676 elementos, com 932.464 tetraedros, 578.837 prismas, 375 pirâmides e 474.690 nós. A malha gerada pelo Ansys meshing está apresentada pela Figura 17.

Figura 17 – Malha do fluido na sala de amostras



Fonte: A autora (2022)

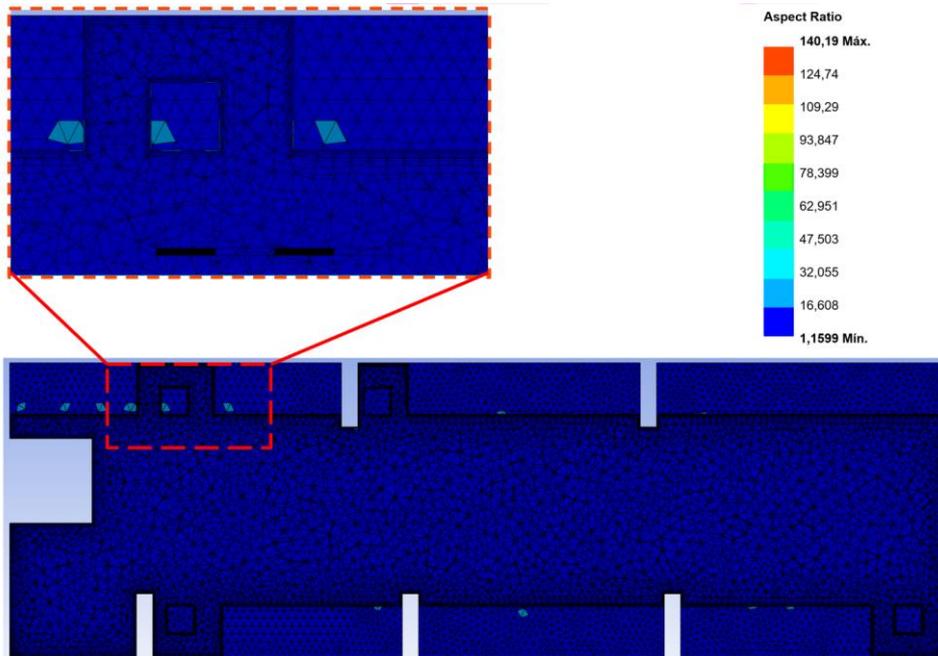
Cada elemento possui $5 \cdot 10^{-2}$ m de comprimento mínimo aproximado, com taxa de crescimento linear padrão de 1,2 e tamanho máximo de elemento de 0,1 m. O rigor da solução numérica do modelo, o tempo de simulação e a taxa de convergência estão associadas à qualidade da malha.

Alguns parâmetros são estudados com a finalidade de utilizar a discretização adequada para solução do caso CFD. Os diagnósticos de qualidade da malha incluem medidas de ortogonalidade e proporção da malha (aspect ratio). Para cada medida, existem faixas de valores que são consideradas boas, aceitáveis e ruins (ANSYS CFX, 2018). A seguir, foi apresentada a análise dos parâmetros de qualidade de malha realizadas no estudo.

Inicialmente foi analisado o parâmetro de aspect ratio, que relaciona a maior e menor aresta da face do volume de controle, a proporção ideal é de 1. A Figura 18 apresenta um estudo da malha mediante esse parâmetro. Pode ser observado na figura que o valor de aspect ratio foi próximo de 1,16, o qual é considerado de boa qualidade para simulação.

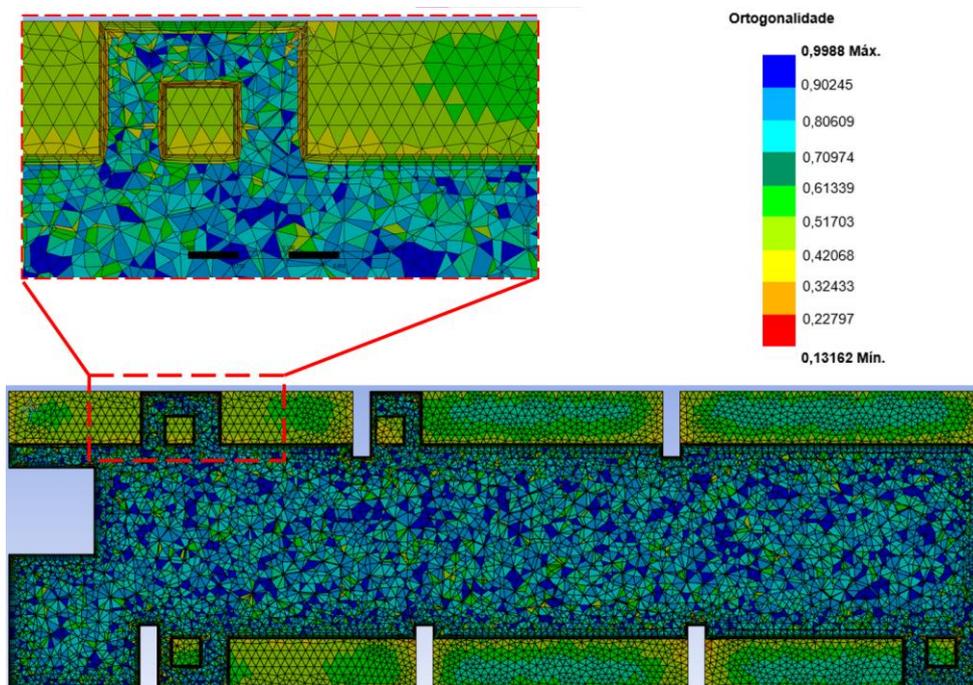
A ortogonalidade está relacionada com a proximidade dos ângulos entre as faces dos volumes de controle. Os valores podem variar na escala de 0 a 1, sendo 0 (ruim) e 1 (excelente). No caso de estudo da malha da sala de amostras, esse parâmetro apresentou resultados aceitáveis, variando de 0,13162 a 0,9988, conforme Figura 19.

Figura 18 – Parâmetro Aspect Ratio



Fonte: A autora (2022)

Figura 19 – Parâmetro de ortogonalidade



Fonte: A autora (2022)

Nas regiões próximas às fontes radioativas naturais, houve um refinamento da malha, como é mostrado nas Figuras 18 e 19, e uma discretização com camadas de prisma obtidas com a utilização da ferramenta *inflation* do Ansys CFX, o que resultou em maior acurácia nos resultados nessas superfícies, através da determinação de uma alta ortogonalidade minimizando os erros na solução do caso.

4.3.1.3 Condições de contorno.

As condições de fronteira específicas são definidas ainda nesta etapa, na plataforma ANSYS, no módulo ANSYS CFX-Pre. Nesse módulo são configuradas as regiões de ocorrência dos fenômenos físicos estudados.

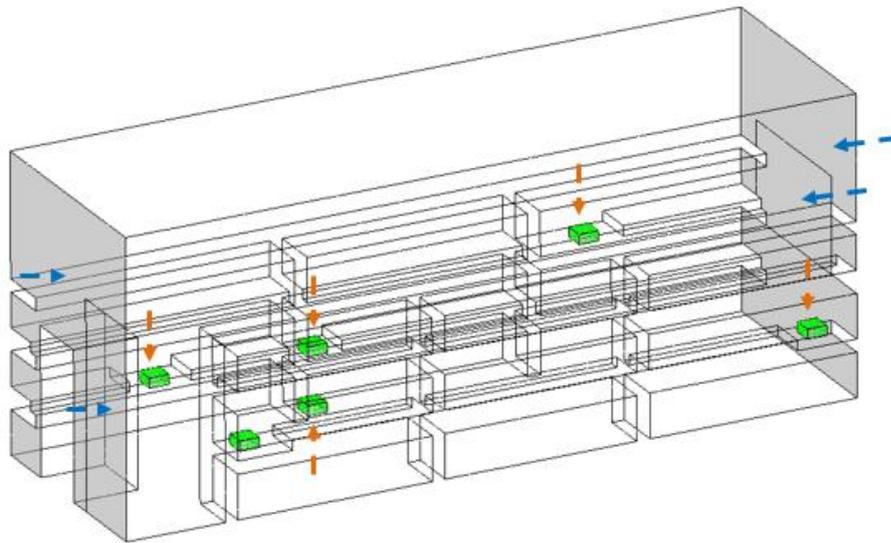
Para simulação foram modeladas as paredes frontal e traseira, as fontes ambientais, a porta e janela da sala de amostras. Para essas regiões foi atribuído a condição de contorno *wall*, na qual o fluido cria perfis de concentração à medida que se distancia das superfícies modeladas. O termo fonte de radônio foi inserido somente nas superfícies que representam as fontes ambientais.

Na solução numérica do ANSYS CFX as grandezas devem ser descritas na forma das sete unidades fundamentais do SI, com isso, foi necessário a conversão das unidades da taxa de exalação de radônio, expressa em (Bq.m².h⁻¹), utilizando um fator de conversão descrito por Wang e Ward (2000), no qual, 1 Bq equivale a 1,75 x 10⁻¹⁹ kg e a transformação do tempo para segundo. Logo, o dado de entrada para o radônio no modelo foi modelado a partir da Equação 11, onde os termos de tempo e exalação foram convertidos.

$$G_{\text{radônio}} = \frac{E \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \cdot 1,75 \times 10^{-19} \left[\frac{\text{kg}}{\text{Bq}} \right]}{3600 \left[\frac{\text{h}}{\text{s}} \right]} \quad (9)$$

Considerando que o fluxo de radônio se deu por convecção natural, os dados de temperatura obtidos pela monitoração descrita em 4.2 foram inseridos no ANSYS CFX Pre, conforme Figura 20.

Figura 20 – Representação das condições de contorno inseridos no modelo



— ►: Temperatura [°C]

— ►: Exalação de radônio [kg.m⁻².s⁻¹]

Fonte: A autora (2022)

4.3.1.4 Modelagem do transporte do Rn

A forma geral da equação de transferência de massa de radônio, conhecida como a equação de transporte total de radônio, realiza a integral dos termos de difusão, advecção, geração de radônio e sua taxa de decaimento. Wang e Ward (2000) demonstraram que, em um estado estacionário e fluxo incompressível a equação de conservação é escrita conforme a Equação 10.

$$\frac{dc}{dt} = \nabla \cdot (D\nabla C) + \nabla \cdot CV - \lambda_{Rn}C + G \quad (10)$$

Onde C é a concentração de Rn no ar (Bq.m⁻³); D é a constante de difusão do Rn no ar; V é o vetor velocidade; $\lambda_{Rn} = 2,1 \times 10^{-6}$ s e G a taxa de geração de radônio (Bq.m⁻².h⁻¹). Segundo Akbari (2015), os mecanismos de advecção de radônio estão relacionadas às condições ambientais, a saber, o fluxo de ar, a taxa de ventilação, a temperatura interna, a umidade relativa e diferenças de pressão.

Para a modelagem do radônio no estudo, a condição de parede (wall) foi atribuída nas paredes, piso, teto e fontes radioativas ambientais. Também foi necessário inserir esse isótopo

radioativo na biblioteca do ANSYS CFX, com a caracterização dos parâmetros físicos conforme apresentados na Tabela 1. Posteriormente, um subdomínio foi inserido na simulação para atribuir o termo de $-\lambda_{Rn}C$, de modo a considerar o decaimento do radônio na solução numérica.

O método dos volumes finitos (MVF) foi usado para simular a distribuição de radônio dentro da sala. Neste método, o fluxo de fluido nas equações governantes são discretizadas em cada nó no domínio e soluções das equações algébricas correspondentes fornecem distribuição de variável de interesse.

4.3.2 Solver

Com o uso do CFX solver Manager é permitido ao usuário parar a solução e alterar as condições de resolução e continuar com o solver a partir das modificações realizadas. É possível também ver resultados prévios gravados nos *backups* para acompanhar a solução, dentre outras funções. Também é definido a quantidade de núcleos que serão utilizados para solução do caso. Nesse trabalho foram utilizados 4 núcleos para solução dos resultados.

4.3.2.1 Modelo de turbulência – Abordagem RANS

Na abordagem RANS são empregados modelos matemáticos para a predição da mistura e difusão causada pelos vórtices de turbulência. Ao utilizar um modelo de turbulência, a equação de Navier-Stokes é substituída pela equação de médias de Reynolds (RANS), na qual é introduzido o termo conhecido como tensão de Reynolds (τ_{ij}), que representa a influência das flutuações turbulentas no fluxo médio (Çengel e Cimbala, 2006). Estes tensores requerem uma modelagem introduzindo uma equação adicional, que são os modelos de turbulência. Dentre os modelos, os mais utilizados são os modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$.

Para solução do caso no presente estudo foi utilizado o modelo $\kappa - \varepsilon$.

- Descrição do Modelo $\kappa - \varepsilon$

Moura (2016) O modelo $k - \varepsilon$ é o mais amplamente utilizado entre os modelos de turbulência e que se encontra incorporado na maioria dos códigos comerciais em CFD. Pertence à classe dos modelos a duas equações, em que as equações de transporte do modelo são resolvidas por duas quantidades turbulentas, isto é, k e ε . Nesse modelo a energia cinética (κ) e

a escala de comprimento (ε), são dadas como as características da turbulência. As equações para κ e ε são expressas pelas Equações 11 e 12.

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla(\rho\kappa U) = \nabla \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t \cdot S_{ij} - \rho\varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho\varepsilon U) = \nabla \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon\rho} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (12)$$

A viscosidade turbulenta pode ser definida por Malalasekera e Versteeg (1995), como demonstrado na Equação 13.

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

Segundo Malalasekera e Versteeg (1995) as equações contêm cinco constantes, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon\rho}$, C_u , σ_ε e σ_k . O modelo $\kappa - \varepsilon$, emprega valores para as constantes que são obtidas por meio de ajuste de dados abrangentes para uma ampla gama de fluxos turbulentos. Os valores das constantes estão apresentados a seguir.

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon\rho} = 1,92; \quad C_u = 0,09; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \text{ e } \sigma_k = 1,0$$

4.3.3 Pós-processamento

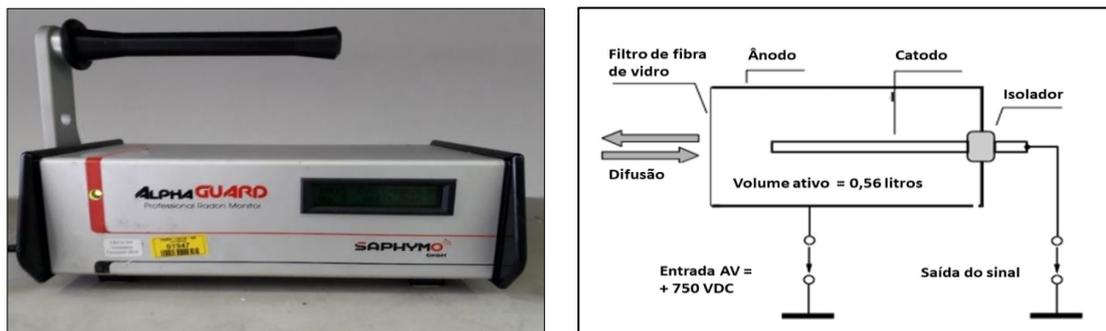
Os resultados das simulações foram apresentados, primeiro na forma gráfica, modelos 3D, para os vetores de velocidade e concentrações de radônio na sala de amostras, com perfis de concentração desses radionuclídeos que foram calculados via CFD. O CFD-Post fornece ferramentas gráficas de pós-processamento que permitem analisar e apresentar os resultados das simulações em Ansys CFX.

4.4 COMPARAÇÃO DO MODELO

Para a comparação do modelo foi utilizada uma câmara de ionização, modelo AlphaGUARD, do Centro Regional de Ciências Nucleares – CRCN/NE. Essa câmara de ionização possui um volume ativo de 0,56 L e opera com uma diferença de potencial de +750

V na superfície externa. O detector possui operação de difusão e fluxo com faixa de medição de $< 2 \text{ Bq.m}^{-3} - 2 \text{ MBq.m}^{-3}$. O sistema registra cada pulso em incremento de tempo de 10 minutos, permitindo obtenção de dados da concentração de radônio, torônio e/ou progênie em unidade de Bq.m^{-3} , além da temperatura em $^{\circ}\text{C}$, umidade relativa do ar em % e pressão atmosférica em mbar. O modelo de detecção utilizado pode ser visto na Figura 21.

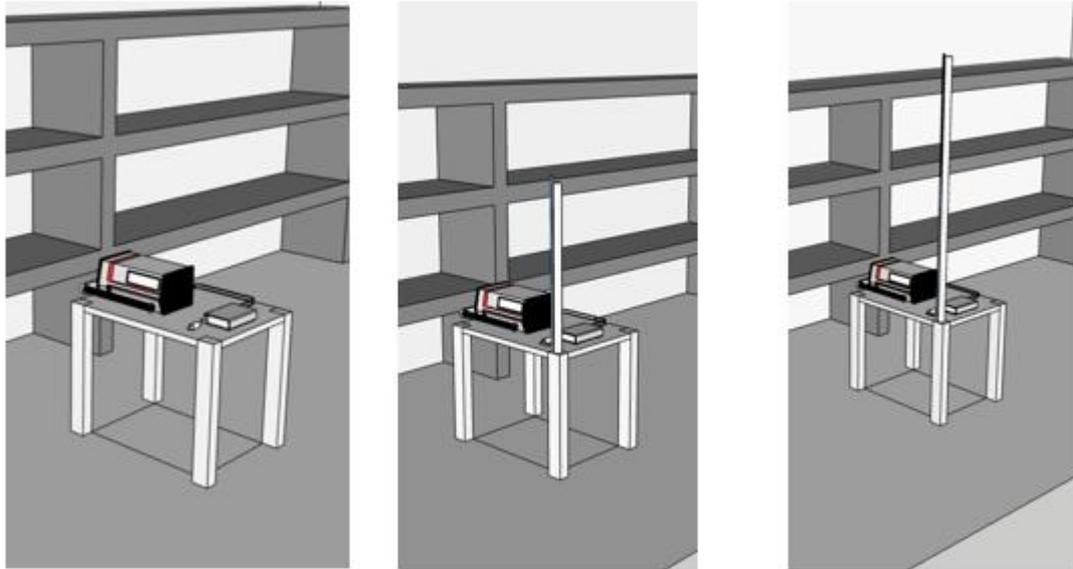
Figura 21 – Detector AlphaGUARD e detalhes de funcionamento



Fonte: Adaptado de Farias (2016).

A medida experimental para obtenção dos dados de validação na sala consistiu da instalação do monitor AlphaGUARD Modelo PQ2000 *PRO* em alturas de 0,50 m, 1,25 m e 1,90 m do piso da sala, conforme Figura 22. As alturas foram definidas com base na posição das fontes ambientais. As medidas no ar foram realizadas continuamente por um período de 24 horas para cada posição.

Figura 22 – Arranjo experimental para determinação de dados para simulação



Fonte: A autora (2022)

A comparação do modelo computacional para dispersão de radônio em ambiente interno foi realizada com a comparação entre os resultados empíricos, obtidos com o AlphaGUARD, e os cálculos numéricos, obtidos pelo software.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo aborda os resultados e as discussões desenvolvidas neste trabalho. Apresenta as condições iniciais e de contorno para definição do modelo computacional que descreve o comportamento do radônio em ambiente *indoor*.

5.1 DETERMINAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO CFD

Nessa etapa foram obtidos os dados de entrada da simulação. Os parâmetros determinados empiricamente foram: temperatura, concentração e taxa de exalação do radônio.

A obtenção dos dados de temperatura foi registrada três vezes no dia, no período da manhã até o final da tarde. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos, com os valores médio e de desvios padrão.

Tabela 2 – Temperatura média da sala de amostras do RAE/DEN/UFPE

REFERÊNCIA	TEMPERATURA (°C)	
	$x \pm \sigma$	CV (%)
Parede frontal	$27,0 \pm 0,06$	0,21
Parede traseira	$32,9 \pm 0,06$	0,18
Porta	$25,0 \pm 0,10$	0,40
Janela	$37,0 \pm 0,17$	0,47

Fonte: A autora (2022)

X: média aritmética; σ : desvio padrão; CV: Coeficiente de Variação.

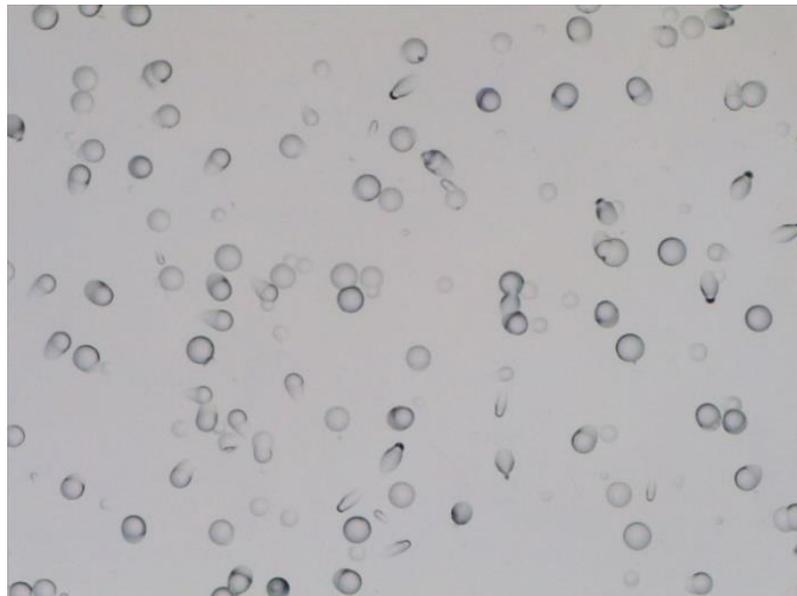
Como demonstrado na Tabela 2, os dados de temperatura obtidos na parede frontal apresentaram uma média de $27,00 \pm 0,06$ °C ao longo do dia, e um coeficiente de variação de 0,21%, indicando assim distribuição homogênea dos dados, ou seja, a temperatura na parede frontal não apresentou diferenças significativas ao longo do dia. De forma análoga, a parede traseira também não apresenta variação significativa ao longo do dia, com uma média de $32,9 \pm 0,06$ °C. Vale salientar que mesmo com incidência solar até período do final da manhã, não houve muita variação na temperatura, isto foi demonstrado pelo baixo coeficiente de variação obtido (0,18 %). As temperaturas médias da porta e janela são, respectivamente, $25 \pm 0,1$ °C e $37 \pm 0,17$ °C e coeficiente de variação de 0,4% e 0,47%, os quais se caracterizam

como dados homogêneos. Com base nos dados apresentados na Tabela 2, pode-se inferir que o calor flui a partir da parede traseira, devido a que foi obtida uma maior temperatura nesta.

Conforme esperado, a média da temperatura da parede traseira é superior à parede frontal. A diferença de temperatura entre as médias das paredes traseira e frontal é de 5,9 °C, assegurando a movimentação do gás por convecção natural, conforme proposto neste estudo.

O segundo parâmetro determinado experimentalmente foram as concentrações de radônio, obtidas pelo sistema de detecção passivo com os detectores de trilha. Os materiais detectores, CR-39, após serem retirados dos espectrômetros σ Espec-222, foram revelados e analisados em microscópio óptico, conforme pode ser visto pela imagem da Figura 23, de um dos campos capturados.

Figura 23 – CR-39 da Fonte 01 com aumento de 100x no microscópio.



Fonte: A autora (2022).

Os dispositivos revelados apresentaram uma considerável quantidade de traços nucleares, conforme Figura 23, devido ao alto teor de radônio contido nas amostras ambientais e o tempo de exposição na sala de amostras. O tratamento das imagens foi realizado em duplicata e foi considerado o número médio da quantidade de traços para determinação da concentração de radônio em cada dispositivo medido.

A partir dos dados de traços nucleares, foi calculada a concentração do ^{222}Rn pela Equação 7 para cada dispositivo, conforme apresentado na Tabela 3. Com isso foi possível modelar o resultado para implementação no ANSYS CFX.

Tabela 3 – Concentração e taxa de exalação de radônio na sala de amostras com CR -39

Entrada	$\bar{C}_{Rn}(\text{Bq.m}^{-3}) \pm \sigma$	E (Bq.m⁻².h⁻¹)
Dispositivo 1	1.361 ± 17	4,0E-2 ± 3,6E-4
Dispositivo 2	675 ± 5	2,0E-2 ± 1,1E-4
Dispositivo 3	350 ± 2	1,0E-2 ± 4,6E-5
Dispositivo 4	414 ± 16	1,2E-2 ± 3,3E-4
Dispositivo 5	437 ± 25	1,3E-2 ± 1,0E-4
Dispositivo 6	335 ± 16	9,9E-3 ± 3,4E-4

Fonte: A autora (2022)

\bar{C}_{Rn} : Concentração média de radônio; σ : desvio padrão médio E: Taxa de exalação.

Conforme visto na Tabela 3, os resultados obtidos para as concentrações dos dispositivos variaram entre $335 \pm 16 \text{ Bq.m}^{-3}$ a $1.361 \pm 17 \text{ Bq.m}^{-3}$, correspondente aos dispositivos 6 e 1 respectivamente.

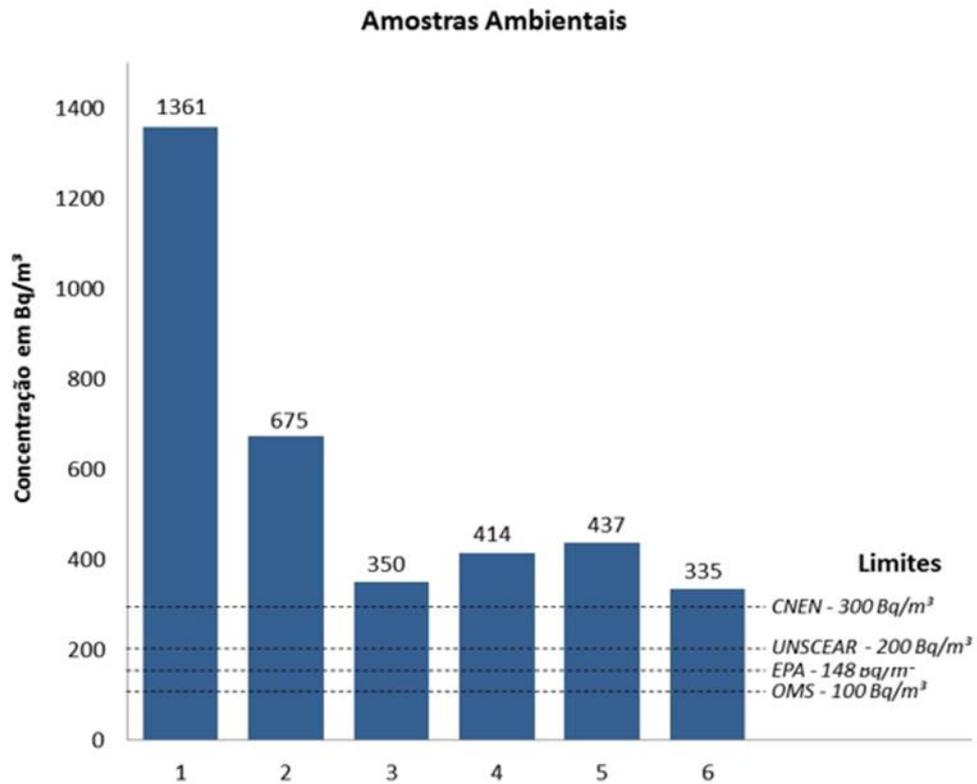
Na Figura 24 foram detalhados os resultados deste estudo, comparando-os com órgãos que regulamentam a exposição ao radônio, entre eles a CNEN, UNSCEAR, EPA e OMS. A OMS propõe um nível de referência de 100 Bq.m^{-3} para minimizar os riscos para a saúde devidos à exposição interior ao radônio. Segundo a OMS (2019), se este nível não puder ser alcançado nas condições prevalentes específicas da região de estudo, o nível de referência escolhido não deve exceder 300 Bq.m^{-3} , o que representa aproximadamente 10 mSv por ano, de acordo com cálculos recentes da Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

Conforme observado na Figura 24 os valores de concentração de radônio para todas as medidas trabalhadas superam os limites recomendáveis para concentração deste radioisótopo pelas agências de controle.

Para implementação do radônio no software, foi necessário a determinação da geração de radônio ($G_{\text{radônio}}$), com base na taxa de exalação, a partir da Equação 9, conforme apresentado na Tabela 4.

A partir dos dados expostos na tabela, é possível observar que os valores da taxa de exalação calculada nos dispositivos quando adequados para os padrões preestabelecidos no software apresentam relevante diminuição. Isso se caracteriza pelo fator de conversão de Bq para Kg ser na casa de 10^{-19} , conforme Wang e Ward (2000).

Figura 24 – Relação entre a concentração das fontes ambientais e os limites regulatórios



Fonte: A autora (2022)

Tabela 4 – Fluxo mássico de Rn na sala de amostras

Entrada	Geração de Rn (kg.m⁻².h) x 10⁻²⁵
Dispositivo 1	29,60
Dispositivo 2	9,72
Dispositivo 3	5,96
Dispositivo 4	5,04
Dispositivo 5	6,29
Dispositivo 6	4,83

Fonte: A autora (2022)

5.2 SIMULAÇÃO CFD

Neste tópico estão apresentados os resultados obtidos após 128.000 iterações durante a simulação. Inicialmente serão expostos e comentados os perfis de temperatura e concentração mássica de radônio do modelo simplificado da sala de amostras.

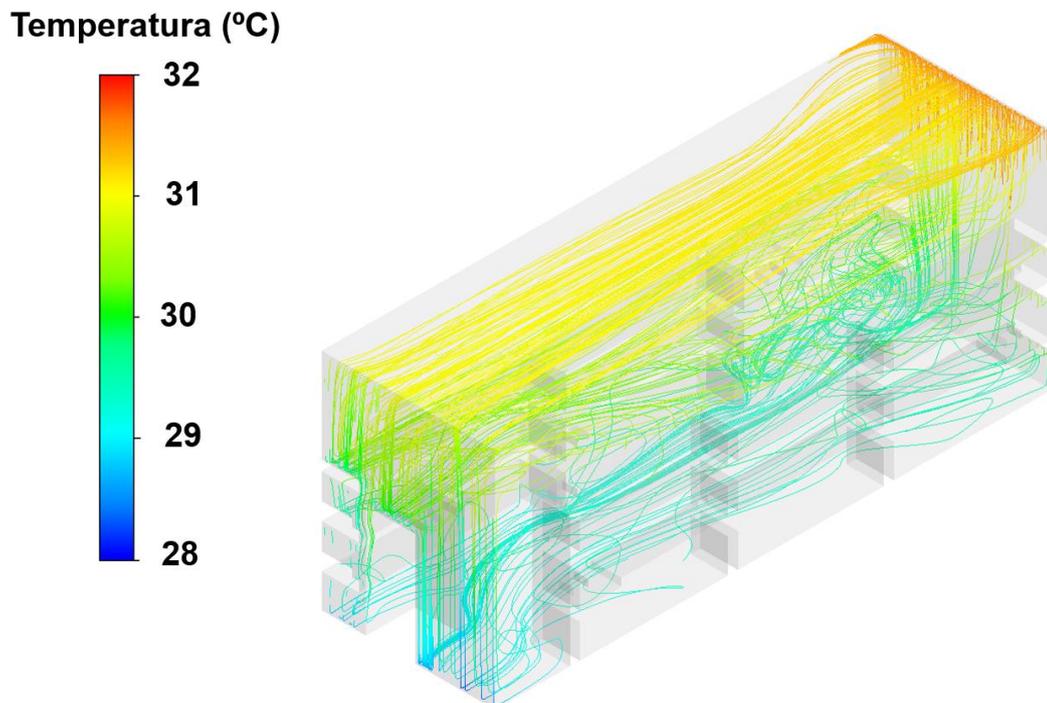
A Tabela 5 apresenta como os domínios computacionais foram configurados no ANSYS CFX-Pre, relacionados à condição das temperaturas, em valores aproximados, aplicadas no modelo. A condição de parede (wall) foi determinada nessas superfícies garantindo o não deslizamento do fluido. Na Figura 25 estão apresentados os dados simulados de temperatura na parede frontal e traseira a partir dos dados dispostos na Tabela 2. A escala termométrica representa a temperatura em Celsius.

Tabela 5 – Condições de contorno de temperatura inseridos no ANSYS CFX

<i>Boundary</i>	<i>Tipo</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
Porta	Wall	25
Janela	Wall	37
Parede frontal	Wall	27
Parede traseira	Wall	33

Fonte: A autora (2022).

Figura 25 – Distribuição do fluxo de temperatura para movimento do fluido

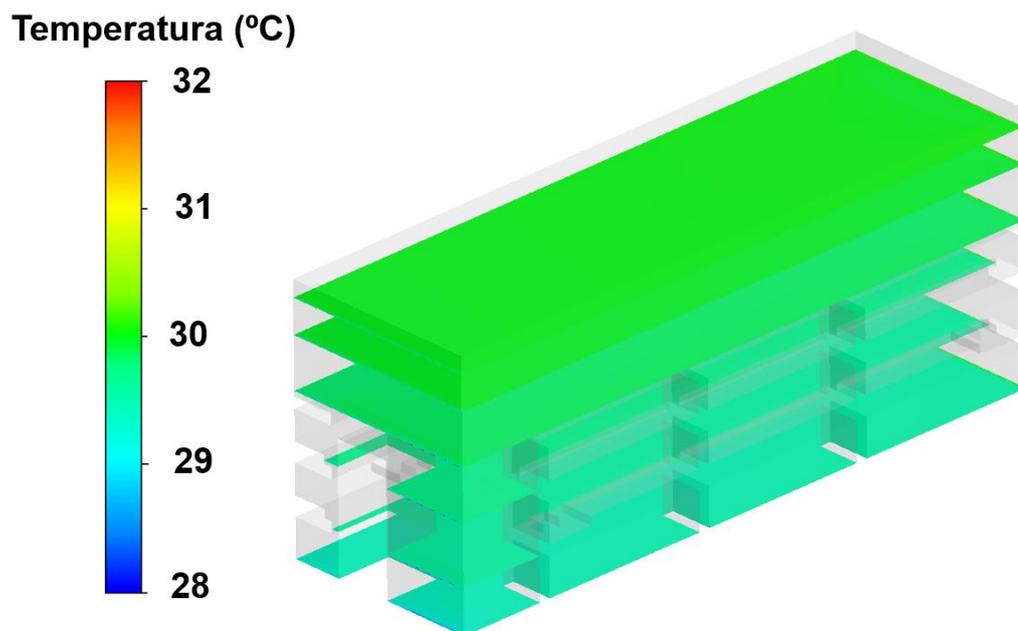


Fonte: A autora (2022)

No ANSYS CFX a temperatura variou entre 28°C e 32°C, valor próximo do implementado no ANSYS CFX Pre. As linhas de fluxo da distribuição de temperatura na sala apresentada pela Figura 25 mostram que na parte superior a temperatura é mais elevada quando comparada com a região inferior. Além disso, é possível observar uma região de recirculação nas proximidades da janela, a temperatura média nessa região é de 30°C, conforme Figura 25. Com isso existe a possibilidade do acúmulo do fluido nessa região, já que o fluxo térmico está concentrado nesse local.

A partir dos dados de temperatura das paredes frontal e traseira, o gradiente de temperatura formado na sala de amostras corresponde a uma temperatura média de 31°C, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Representação da temperatura na sala de amostras

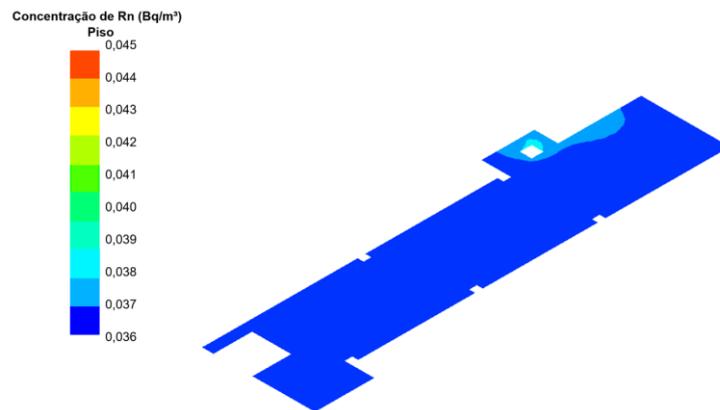
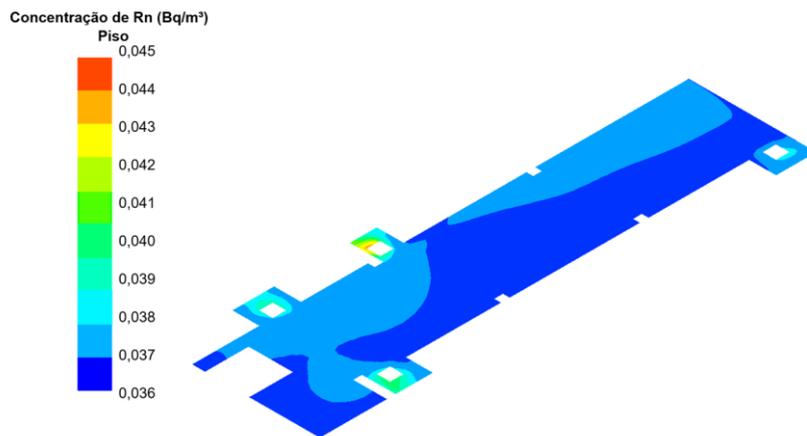
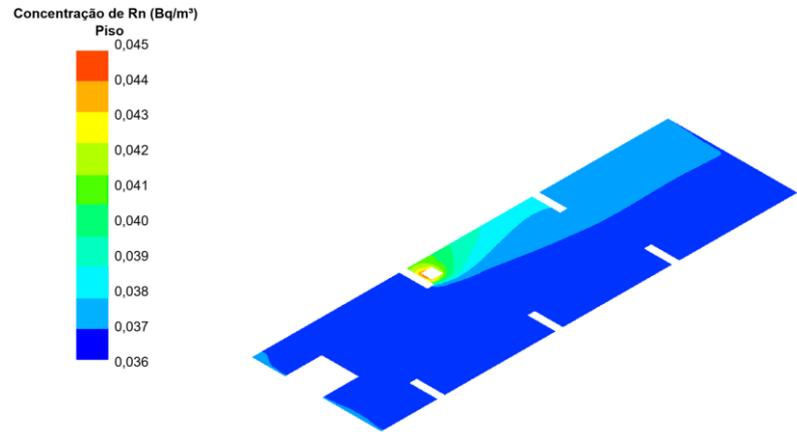


Fonte: A autora (2022)

Os valores encontrados após a modelagem do fluxo mássico de radônio oriundo das fontes ambientais estão na ordem de 10^{-25} , fazendo com que os resultados computacionais sejam observados de forma qualitativa no modelo. Os valores de concentração de radônio variaram de $0,036 \text{ Bq.m}^{-3}$ até $0,045 \text{ Bq.m}^{-3}$, conforme Figura 27, refletindo a distribuição do radônio na sala de amostras. A distribuição do radônio na sala de amostras, como esperado, tem sua maior concentração nas regiões onde estão localizadas as fontes radioativas. Na Figura 27 estão

indicados três perfis horizontais da sala de amostras: a) perfil do piso, b) perfil a 0,50 m e c) perfil a 1,25 m de altura, tendo como referência o solo.

Figura 27 – Distribuição horizontal da concentração de radônio na sala de amostras

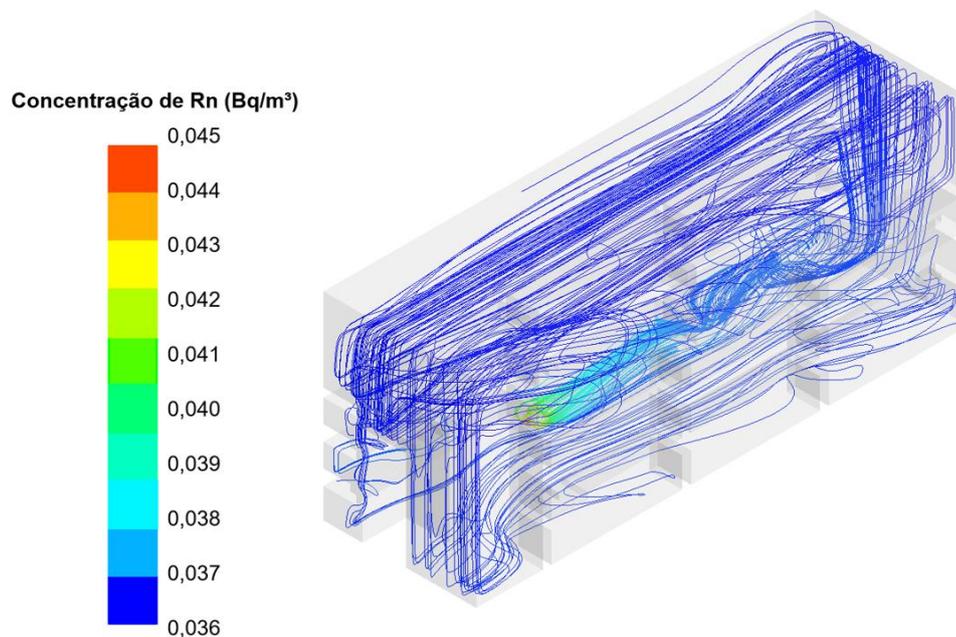


Fonte: A autora (2022)

Para o perfil do piso foi observada a região de maior concentração do radônio a partir do dispositivo 1, conforme Figura 27 (a). Para o perfil a 0,5 m de altura, observa-se que o local de maior concentração de radônio corresponde à região onde está localizada o dispositivo 2, segundo maior valor de concentração de radônio a partir dos dados experimentais. Ainda no mesmo perfil, a segunda região de maior concentração do radônio corresponde à localização do dispositivo 5, seguida pelo dispositivo 4 e, por fim, a Fonte 6, corroborando os dados obtidos experimentalmente. No perfil a 1,25 m de altura, onde está localizada o dispositivo 3, cuja representação da concentração mássica foi menor que a demonstrada pela Fonte 4 e maior que a representada pelo dispositivo 6, traduzindo a boa coerência com os dados experimentais qualitativamente.

Como forma de representar o movimento do radônio na sala de amostras, a Figura 28 demonstra o fluxo gerado a partir do dispositivo 1, por ser a fonte de maior representatividade na concentração do ^{222}Rn na sala de amostras. É possível observar uma região de acúmulo desse gás na área de recirculação gerada pela diferença de temperaturas nas paredes frontal e traseira, conforme esperado e demonstrado na Figura 25.

Figura 28 – Dispersão do Rn gerado pelo dispositivo 01 na sala de amostras DEN/UFPE

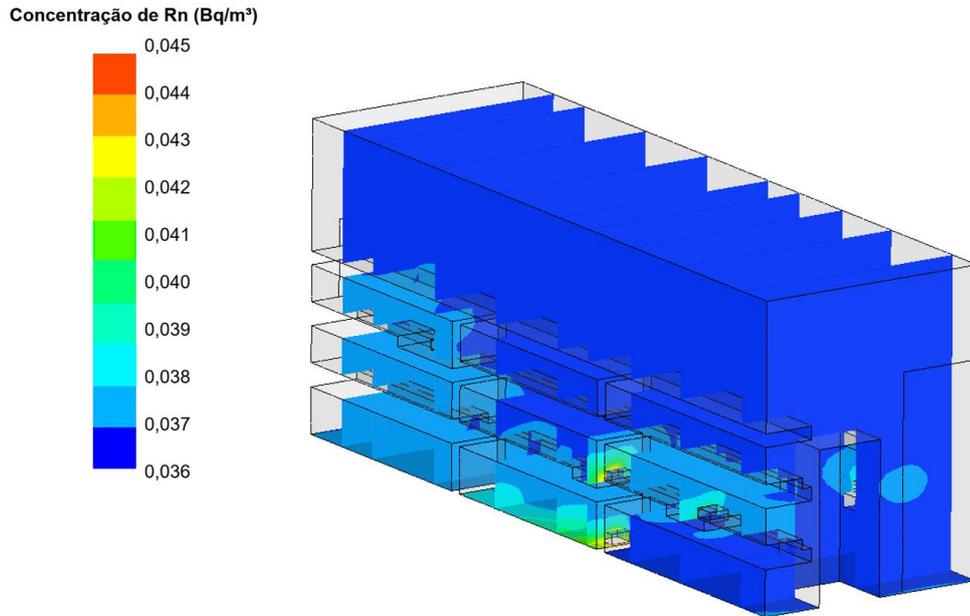


Fonte: A autora (2022)

De forma geral, o radônio se concentra na região inferior conforme esperado devido à presença de amostras com alto *background* no piso da sala de amostras, conforme mostrado na

Figura 29. Outro fato que poderia influenciar o aumento da concentração de Rn é por ser obtida temperatura mais baixa nas regiões mais próxima do solo, como foi visto na Figura 25, diminuindo a dispersão do radônio nessas regiões.

Figura 29 – Contornos da dispersão do Rn na sala de amostras DEN/UFPE



Fonte: A autora (2022)

Na Figura 29, as áreas de maior concentração estão indicadas por cores quentes, que podem ser observadas próximas às regiões das fontes. A inserção do termo de decaimento, conforme Equação 10, no subdomínio do software obteve êxito, sendo determinante para que o gás não acumulasse continuamente na sala de amostras. Garantindo a distribuição desse radionuclídeo em diferentes gradientes de concentração.

5.3 COMPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A comparação da modelagem consistiu em duas etapas: uma experimental, para determinação da medida de concentração de radônio no ar, seguida pela comparação com os dados simulados.

Os dados de concentração do radônio para validação do modelo simulado, medidos com o detector AlphaGUARD, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Medidas experimentais de concentração do ^{222}Rn com o AlphaGUARD

Alturas (m)	$\bar{C}_{Rn} \pm \sigma$	Mín.	Máx.	CV (%)
	Bq.m ⁻³			
0,5	271 ± 65	125	426	24
1,2	275 ± 52	162	428	19
1,9	254 ± 61	118	392	24

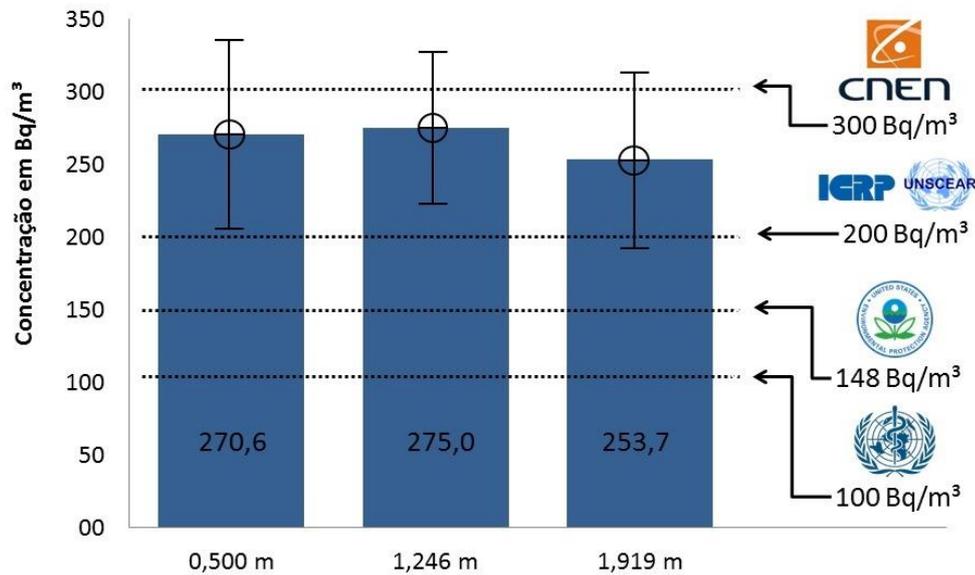
Fonte: A autora (2022)

σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Mín: valor mínimo; Máx: valor máximo.

A concentração média obtida pelo AlphaGUARD para a altura de 0,5 m foi de aproximadamente $271 \pm 65 \text{ Bq.m}^{-3}$, sendo 125 Bq.m^{-3} o valor mínimo encontrado e 426 Bq.m^{-3} o máximo. O coeficiente de variação para esta altura foi o mais significativo, com um valor de aproximadamente 24%, ainda assim, os dados de concentração possuem baixa dispersão. Para a altura de 1,2 m, a média encontrada foi, em valor aproximado, de $275 \pm 52 \text{ Bq.m}^{-3}$, os valores mínimo e máximo foram 162 Bq.m^{-3} e 428 Bq.m^{-3} , respectivamente, que apresentou menor dispersão. Para a altura de 1,9 m, o valor médio encontrado próximo de $254 \pm 61 \text{ Bq.m}^{-3}$, com valor mínimo de 118 Bq.m^{-3} e máximo 392 Bq.m^{-3} , com coeficiente de variação em torno de 24%.

A Figura 30 apresenta um gráfico comparativo entre a concentração de ^{222}Rn medida com o AlphaGUARD, e os limites recomendáveis pelas agências de controle. A concentração de radônio medida no ar apresentou valores próximos, quando comparado ao limite recomendado pelo ICRP.

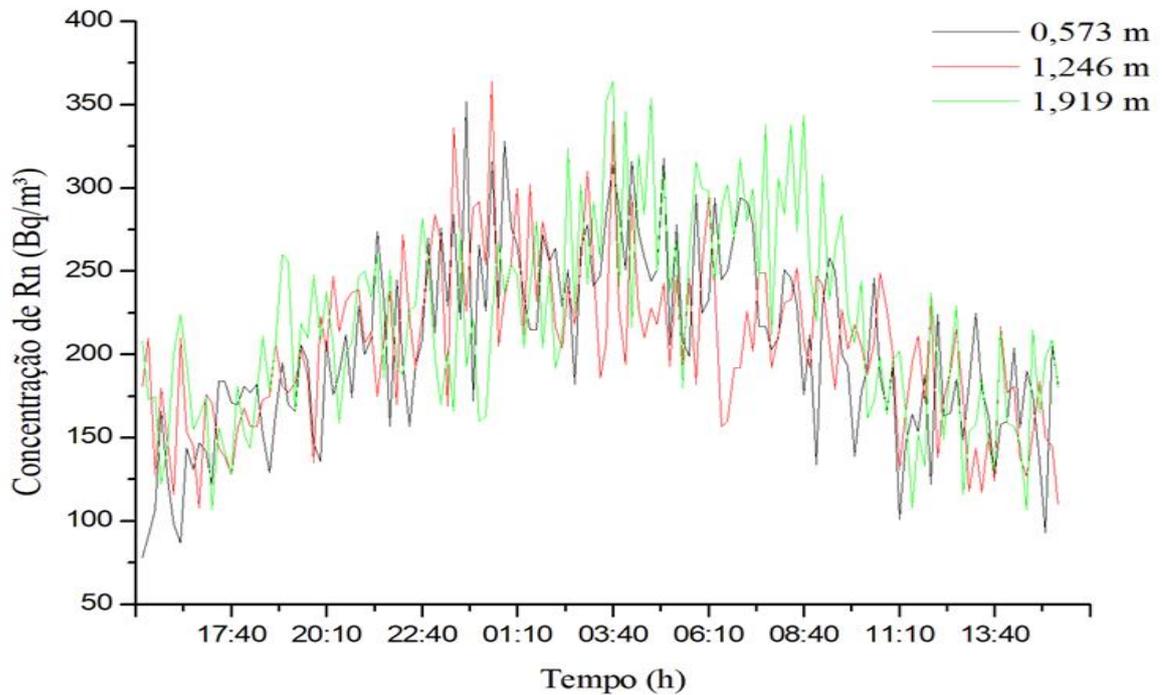
Figura 30 – Relação entre a concentração de radônio no ar e os limites regulatórios



Fonte: A autora (2022)

Diante dos valores determinados pelas agências de controle, os valores de concentração obtidos estão acima dos limites exigidos pelos órgãos internacionais. Em relação a CNEN, órgão nacional, os valores médios estão ligeiramente inferiores ao limite máximo de 300 Bq.m^3 , contudo, considerando o desvio padrão da concentração de radônio no ar da sala de amostras, estes valores podem variar de $335,6 \text{ Bq.m}^{-3}$ a $327,3 \text{ Bq.m}^{-3}$, que superam os valores preestabelecidos pela CNEN.

O comportamento da dispersão do radônio ao longo de 24 horas nas alturas de 0,5 m; 1,2 m e 1,9 m da sala de amostras está apresentado na Figura 31 e reflete um aumento dos níveis na madrugada onde a temperatura é relativamente mais baixa, em média de 30°C e com umidade relativa média de 71%. Já nos períodos da manhã e tarde a temperatura média é de 33°C e a umidade relativa média nessas faixas de horário, fica em torno de 65%, que já é suficiente para alterar a concentração desse gás no ambiente interno.

Figura 31 – Variação da concentração de ^{222}Rn ao longo do dia

Fonte: A autora (2022)

Analisando a Figura 31 é possível perceber que os níveis de concentração do radônio na sala de amostras apresentam um comportamento uniforme nas três alturas em dias diferentes, mesmo que o radônio tenha tendência a se concentrar próximo ao solo, pela sua maior densidade, quando comparada à densidade do ar, sua presença foi detectada nas diferentes alturas da sala de amostras.

A partir dos dados de concentração de radônio na sala, uma comparação foi realizada entre os valores obtidos com o monitor AlphaGUARD e simulados em ANYS CFX, a fim de determinar um modelo computacional validado para utilização em ambientes internos sob influência de amostras radioativas ambientais. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados e a diferença percentual entre os valores.

Tabela 7 – Concentração de Rn na sala de amostras (Bq.m⁻³)

Altura (m)	Experimental (Bq.m ⁻³)		Computacional (Bq.m ⁻³)	
	X ± σ	CV (%)	X ± σ	CV (%)
0,5	270,6 ± 65	24	0,04 ± 0,003	7,4
1,246	275 ± 65	23	0,04 ± 0,003	7,4
1,919	253,7 ± 73,6	29	0,04 ± 0,003	7,4

Fonte: A autora (2022)

X: média aritmética; σ: desvio padrão; CV: Coeficiente de Variação.

Com a comparação dos resultados numéricos de simulação e experimentais é possível observar uma diferença significativa entre os resultados. Entretanto, os gráficos 3D da dispersão do radônio representaram o comportamento esperado desse fluido na sala de amostras.

Algumas alternativas para aprimoramento do modelo é a realização de mais experimentos para aquisição dos dados de entrada da simulação, bem como a possibilidade de caracterizar as amostras radioativas na geometria do domínio, levando em consideração parâmetros específicos como a porosidade e o volume do material, por exemplo.

Incluir as trocas térmicas entre as paredes, piso e teto nas condições de contorno, pode ser outro fator que resulte na melhor determinação quantitativa dos resultados por convecção natural. Além disso, pode ser realizado um estudo com malhas de diferentes números de elementos, devido à condição aplicada neste estudo, que foi a convecção natural.

Apesar da solução numérica do modelo ter apresentado diferenças com os dados experimentais de validação, a simulação CFD evidenciou o comportamento real do radônio, coincidido com o descrito pela literatura. Os dados apresentados no presente estudo podem ser utilizados de forma qualitativa permitindo auxiliar na determinação de medidas de mitigação de radônio, bem como na elaboração de um protocolo de segurança para acomodação de materiais radiativos na sala, de forma a atenuar a concentração do radônio e descendentes no ambiente.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho de dissertação foi possível construir um modelo computacional para avaliar a distribuição de radônio em ambientes internos, usando modelagem com CFD.

Em ambiente controlado, foi possível estimar a taxa de exalação de radônio à partir do cálculo de sua concentração.

A modelagem com ANSYS CFX possibilitou entender o comportamento do radônio no ambiente interno, cujo comportamento dos níveis do radônio foi influenciado pela diferença de temperatura na sala, gerando um gradiente que contribui para difusão do gás.

Os dados simulados apresentaram diferenças significativas quando comparados aos resultados empíricos, onde recomenda-se novos estudos para adequação dos parâmetros de entrada ao modelo, de forma que uma metodologia específica para a medição da taxa de exalação do radônio seja elaborada.

A malha gerada no ANSYS meshing foi suficiente para modelar o estudo de caso do movimento do radônio por convecção natural através da diferença de temperatura na sala de amostras. A previsão dos níveis de radônio (para o presente caso) por esta técnica é menos demorada, se comparada ao tratamento experimental, embora ainda precise de alguns ajustes para sua validação.

REFERÊNCIAS

AKBARI, K., MAHMOUDI, J. Numerical Simulation of Radon Transport and Indoor Air Conditions Effects. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 3 (6), 1-9. 2012

Akbari, K., Mahmoudi, J., Ghanbari, M., Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house. **J. Environ. Radioact.** 116, 166e173 , 2013

AKBARI, K., **Simulation of Indoor Radon and Energy Recovery Ventilation Systems in Residential Buildings**. 2015. Tese (PHD) - Mälardalen University, [S. l.], 2015.

ANSYS, I. **ANSYS CFX-Solver Manager User's Guide**. 19.0 ed. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2018a. 202 p.

ANSYS, I. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. 19.0 ed. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2018b. 366 p.

Bert Blocken, Thijs Defraeye, Erwin Koninckx, Jan Carmeliet, Peter Hespel. CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists, **Computers & Fluids**. Volume 71. 2013, Pages 435-445, ISSN 0045-7930, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.11.012>.

BRUNETTI, Franco. Mecânica dos Fluidos. *In: MECÂNICA dos Fluidos*. [S. l.: s. n.], 2012.

ÇENGEL, Yunus A. Heat Transfer A Practical Approach, 2nd ed. McGraw-Hill Higher Education. 2002.

CHAUHAN, N., CHAUHAN, R.P., JOSHI, M., AGARWAL, T.K., AGGARWAL, P., Sahoo, B.K. Study of indoor radon distribution using measurements and CFD modeling. **Journal of Environmental Radioactivity**, 136, 105-111.2014.

CHAUHAN, N., CHAUHAN, R.P. Active-passive measurements and CFD based modelling for indoor radon dispersion study. **Journal of Environmental Radioactivity**, 144, 57-61. 2015

Claus E Andersen. Numerical modelling of radon-222 entry into houses: an outline of techniques and results. **Science of The Total Environment**, Volume 272, Issues 1–3, 2001, Pages 33-42, ISSN 0048-9697. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00662-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00662-3).

Cozmuta I, van der Graaf ER, de Meijer RJ. Moisture dependence of radon transport in concrete: measurements and modeling. **Health Phys.** Oct;85(4):438-56. doi: 10.1097/00004032-200310000-00008. PMID: 13678285. 2003

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. Resolução nº 171. Nível de dispensa para o uso do fosfogesso na construção civil. Rio de Janeiro, 2014.

COSTA, L. J. P. **Estudo da Exalação de Radônio em Placas e Tijolos de Fosfogesso de Diferentes Procedências.** (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2011.

Degu Belete G, Alemu Anteneh Y. General Overview of Radon Studies in Health Hazard Perspectives. **J Oncol.** 2021 Jul 31;2021:6659795. doi: 10.1155/2021/6659795. PMID: 34381503; PMCID: PMC8352703.

DICK, W.; JÖNASSON, I. R. Book radon. Handbook of Exploration Geochemistry, v. 7, Elsevier Science. 2000.

DO NASCIMENTO SANTOS, JOSINEIDE MARQUES et al. α Espec-222 as a variant to the radon monitoring method using a solid state nuclear track. **APPLIED RADIATION AND ISOTOPES JCR**, v. 178, p. 109948, 2021.

DO NASCIMENTO SANTOS, JOSINEIDE MARQUES et al. Influx of radioactive gas in norm occurrences in Northeastern Brazil. **APPLIED RADIATION AND ISOTOPES JCR**, v. 187, p. 110319, 2022.

EPA - Environmental Protection Agency. Indoor Environmental Division. **Radon.** Disponível em: < <http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/radon.html> >.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Building Radon Out.** A stepby-step guide on how to build radon resistant homes. Office of air and radiation, 2001.

Ferziger, Joel H.: Computational Methods for Fluid Dynamics / Joel H. Ferziger / Milovan Perit. - 3., rev. ed. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002 ISBN 3-540-42074-6

FIATES, Juliane. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Simulação de dispersão de gás inflamável por meio de CFD Utilizando OpenFOAM.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas - INICAMP, 2015.

FREUDENRICH, C.; BRAIN, M. HowStuffWorks – How Radon Works. Publicado em 04 de outubro de 2000 (atualizado em 18 de maio de 2007) <
<http://ciencia.hsw.uol.com.br/radonio5.htm>> Acessado em: mar. 2021

Health Canada. **Guia para medições de radônio em residências (casas)**. (2017)

Acessado em maio. 2021: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/health-risks-safety/guide-radon-measurements-residential-dwellings.html>

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **ICRP 126 – Radiological Protection against Radon Exposure**. ICRP Publication 126. Ann. ICRP v. 43, n. 3, 2014.

IRD. Manual da OMS sobre radônio em ambientes internos: uma perspectiva de saúde pública / editado por Hajo Zeeb e Ferid Shannoun. – São Paulo, SP: 1ª Edição, 2016.

JELLE, B.P., NORENG, K., ERICHSEN, T.H., Strand, T., 2011. Implementation of radon barriers, model development and calculation of radon concentration in indoor air. **Journal of Building Physics**, 34, 195-222.

KUMAR, A., Chauhan, R.P., JOSHI, M., SAHOO, B.K., 2014. Modeling of indoor radon concentration from radon exhalation rates of building materials and validation through measurements. **Journal of Environmental Radioactivity**, 127, 50-55.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1995.

Lara, Evelise Gomes. L318p **Potencial de radônio no ar de ambientes interiores residenciais: Aspectos geológicos e construtivos da região metropolitana de Belo Horizonte** / Evelise Gomes Lara. – 201

Lima Flores, A. .; Palomino-Merino, R. P.-M.; Castano, V. M. .; Espinosa, G. . Analysis of Indoor Radon Distribution Within a Room By Means of Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation. **J. Nucl. Phy. Mat. Sci. Rad. A**. 2020, 7, 89-95.

MALALASEKERA, W.; VERSTEEG, H.K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method. 2nd edition, Longman, London, UK, 1995.

MAZZILLI, B. P.; M. M. F.; CAMPOS, M. P. **Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. TNA 5754. IPEN/CNEN-SP. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/201103311026310-Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf.

MORAWSKA, L.; C. R. PHILLIPS, C. R.; Dependence of the radon emanation coefficient on radium distribution and internal structure of the material. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, v. 57, p. 1783-1797, 1993.

MOURA, M. D. **Convecção Natural em Cavidades 3D**. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.TD-37/2016, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121p.

NRPB, 2000. **Health Risks from radon**. National Radiological Protection Board, UK.

PRITCHARD, Philip J. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics**. 8th Edition. John Wiley & Sons. 2010.

SAVIDOU *et al.* Study of natural radionuclides and radon emanation in bricks used in the Attica region. Greece, *J. Environ. Radioact.*, v. 31, p. 21-28, 1996.

Oufni, L. Determination of the radon diffusion coefficient and radon exhalation rate in Moroccan quaternary samples using the SSNTD technique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **256**, 581–586 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1024580506465>.

Oufni, L.; Rabi, R. Study of radon dispersion in typical dwelling using CFD modeling combined with passive-active measurements. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017

SANTOS, T. O. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2010.

SAPHYMO GmbH. **The Reference in Professional Radon Measurement – AlphaGUARD. 2009**. Manual do usuário Saphymo. Disponível em: http://www.saphymo.com/ftp/ecatalogue/154/ag_fb_gb_04_144dpi_ebook.pdf. Acesso em: outubro de 2014.

Tu, Jiyuan; Yeoh, Guan-Heng; Liu, Chaoqun. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 2ª edição. UK: Butterworth-Heinemann, 2013

T.S. Klein, T.J. Craft, H. Iacovides. The development and application of two-time-scale turbulence models for non-equilibrium flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 71, 2018, Pages 334-352, ISSN 0142-727X, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.04.010>.

UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report A/AC.82/-644, **Exposures of workers and the public from various sources of radiation**. United Nations, New York.

UNSCEAR, 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Sources and Effects of Ionizing Radiation**. United Nations, New York.

Wang, F., Ward, I.C., 2000. The development of a radon entry model for a house with a cellar. **J. Build. Environ.** 35, 615e631.

WHO – World Health Organization. Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO Press, 2009.

ZHANG, L.; LEI, X.; GUO, Q.; WANG, S.; MA, X.; SHI, Z. Accurate measurements of radon exhalation rate of building materials using the closed chamber method. **Journal of Radiological Protection**, v.32, p. 315-323, 2012.