

**Universidade Federal de Goiás**  
**Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação**

**Gustavo Gonçalves Gratão**

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AR-CONDICIONADO  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL  
COM SOFTWARE LIVRE**

**Goiânia**

**2023**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo do autor: GUSTAVO GONÇALVES GRATÃO

Título do trabalho: Análise de sistemas de ventilação e ar-condicionado utilizando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional com software livre

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 18/08/2023, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Gonçalves Gratão, Discente**, em 18/08/2023, às 21:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3976274** e o código CRC **A33D72FB**.

**Universidade Federal de Goiás**  
**Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação**  
**Gustavo Gonçalves Gratão**

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AR-CONDICIONADO UTILIZANDO  
TÉCNICAS DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL COM SOFTWARE LIVRE**

Projeto Final de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Orientador: Felipe Pamplona Mariano

**Goiânia**  
**2023**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

GRATÃO, GUSTAVO GONÇALVES  
ANÁLISE DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AR-CONDICIONADO  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE DINÂMICA DOS FLUIDOS  
COMPUTACIONAL COM SOFTWARE LIVRE [manuscrito] /  
GUSTAVO GONÇALVES GRATÃO, FELIPE PAMPLONA MARIANO. -  
2023.

XCIV, 94 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. FELIPE PAMPLONA MARIANO.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Anexos.

Inclui gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Ventilação. 2. Ar-Condicionado. 3. OpenFOAM. 4. Dinâmica dos Fluidos Computacional. I. MARIANO, FELIPE PAMPLONA. II. MARIANO, FELIPE PAMPLONA, orient. III. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

### DESPACHO

#### ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

##### Curso

<input type="checkbox"/> Eng Elétrica	<input checked="" type="checkbox"/> Eng Mecânica	<input type="checkbox"/> Eng Computação PFC 1 ( ) PFC 2 ( )
---------------------------------------	--	--

##### Título do Trabalho

Análise de sistemas de ventilação e ar-condicionado utilizando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional com software livre

##### Banca Avaliadora

Membro 1	Felipe Pamplona Mariano
Membro 2	Andreia Aoyagui Nascimento
Membro 3	Carlos Alberto de Almeida Vilela

##### Discente

Matrícula	Nome
201703920	GUSTAVO GONÇALVES GRATÃO

##### NOTAS

Matrícula	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Média*
	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	
201703920	9,3	9,0	9,0	9,3	6,9	8,1	8,7	6,7	8,1	8,1

NPT – Nota plano de trabalho;

NTE – Nota do trabalho escrito;

NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação:  $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação:  $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

\* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORIENTADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

##### OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2023, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto De Almeida Vilela, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2023, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Aoyagui Nascimento, Professora do Magistério Superior**, em 14/08/2023, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3961137** e o código CRC **49A9B4CA**.

## **Agradecimento**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que foram fundamentais para minha jornada até este momento tão especial. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as oportunidades que me foram concedidas. Agradeço de coração à minha família, cujo amor e presença constante me motivaram a nunca desistir e seguir em frente com determinação

Sou imensamente grato também ao Prof. Dr. Felipe Pamplona, cujo papel como mentor e educador foi essencial para meu crescimento intelectual e pessoal. Suas lições e orientações contribuíram para me tornar uma pessoa mais capacitada e preparada para os desafios futuros. Além disso, agradeço à Universidade Federal de Goiás por proporcionar o ambiente propício ao meu desenvolvimento acadêmico e pessoal, com a presença valiosa de professores, colegas e funcionários que contribuíram para minha formação.

Finalmente, expresso minha gratidão ao CNPq, ao Programa de Iniciação à Pesquisa da UFG e pelo Ministério Público pela concessão da bolsa de iniciação científica, que impulsionou significativamente o desenvolvimento deste trabalho.

## **Resumo**

Neste trabalho, a importância da qualidade do ar interno para a saúde das pessoas foi enfatizada, destacando-se a relevância de um ambiente adequadamente ventilado e climatizado para o bem-estar e conforto dos ocupantes. Foram realizadas análises de diferentes sistemas de ventilação e ar-condicionado utilizando técnicas de dinâmica dos fluidos computacional com software livre, fonte aberta e gratuito. As simulações de escoamentos do ar interno em um recinto foram conduzidas com o uso do OpenFoam, enquanto os dados obtidos foram tratados utilizando o Paraview. Os resultados dos experimentos computacionais foram promissores, com o modelo empregado proporcionando resultados satisfatórios. Esses resultados demonstram o potencial de aplicação dos métodos utilizados em outras análises e fornecem informações valiosas para a otimização de sistemas de ventilação e ar-condicionado em ambientes diversos.

Palavras Chaves: Ventilação, Ar-Condicionado, OpenFOAM, Dinâmica dos Fluidos Computacional.

## **Abstract**

In this work, the importance of indoor air quality for people's health was emphasized, highlighting the relevance of an adequately ventilated and air-conditioned environment for the well-being and comfort of occupants. Analyzes of different ventilation and air-conditioning systems were carried out using computational fluid dynamics techniques with free, open source and free software. Simulations of internal air flows in an enclosure were conducted using OpenFoam, while the data obtained were processed using Paraview. The computational experiments results were promising, with the model employed providing satisfactory results. These results demonstrate the potential application of the methods used in other analyzes and provide valuable information for the optimization of ventilation and air conditioning systems in different environments.

**Keywords:** Ventilation, Air Conditioning, OpenFOAM, Computational Fluid Dynamics.

## Lista de Figuras

Figura 1. Engenheiro Willis Carrier ao lado do primeiro equipamento de ar-condicionado ....	9
Figura 2. Simulação do Escoamento de Ar do Sistema de Ventilação.....	11
Figura 3. Diferença entre ambiente com ventilação inadequada (imagem à esquerda) e ventilação adequada (imagem à direita).....	12
Figura 4 Esquema de Exaustão e Renovação Para Controle de Pressão em EAS.....	13
Figura 5. Tabela de Capacidade de Solução por Solver.....	21
Figura 6. Pastas Iniciais OpenFOAM .....	22
Figura 7. Pasta de Tempo 0 .....	22
Figura 8. Pasta de Constant .....	23
Figura 9 Pasta System .....	23
Figura 10 - Exemplo da estrutura da malha construída utilizando o OpenFOAM.....	24
Figura 11. Representação da malha simulada.....	27
Figura 12. Representação do refinamento da malha (a) malha refinada com $\Delta x=0.050$ m (b) malha refinada com $\Delta x=0.025$ m e (c) malha refinada com $\Delta x = 0.0167$ m. ....	27
Figura 13 - Componente de velocidade v, na posição $x=1,75$ m, $y=1,25$ m e $z=1,25$ m, para as simulações 1, 2 e 3 da Tabela 3.....	29
Figura 14 - Representação da Zona de Ocupação.....	30
Figura 14 - Representação dos Contornos da Malha Utilizada nas Simulações de 10 a 12....	31
Figura 15. Malha utilizada na Simulação 12 da Tabela 6.....	32
Figura 16 – Média da Temperatura T, na posição $x=$ m, $y=$ m, $z=$ m, para as simulações de 10 a 12.....	34
Figura 17 - Campo de temperatura do escoamento da Simulação 12 (Tabela 6) no instante $T=2000$ s.....	35
Figura 19 - Perfil de Velocidade Para Diferentes Refinamentos de Malha e Velocidade .....	36
Figura 20 - Perfil de Temperatura Para Diferentes Refinamentos de Malha.....	37
Figura 21 - Representação Gráfica do EDT entre -1,7 e 1,1 para as simulações: A) Simulação 10, B) Simulação 11 e C) Simulação 12.....	37
Figura 22 - Representação Gráfica da velocidade entre -0,35 e 0,5 m/s para as simulações: A) Simulação 10, B) Simulação 11 e C) Simulação 12. ....	38
Figura 23 - Representação da Malha para a Simulação 13 .....	40
Figura 24 - Representação do Escoamento do Fluxo de Ar Retirado do ParaView da Simulação 13 no instante $T=60$ s.....	41

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Condições de Contorno Para a Velocidade.....	26
Tabela 2 Condições de Contorno Para a Pressão .....	26
Tabela 3 - Conjunto de simulações realizadas no primeiro estudo.....	28
Tabela 4 - Velocidade média do escoamento a cada 25 segundos para a simulações 1, 2 e 3 da Tabela 3 .....	29
Tabela 5 - Média da componente velocidade U e velocidade resultante para as simulações de 1 a 9 para diferentes valores de y no plano (xz) .....	30
Tabela 6 - Conjunto de simulações realizadas no segundo estudo .....	32
Tabela 7 - Velocidade na entrada do ar para as simulações de 10 a 12.....	33
Tabela 8 - Condições de Contorno e Condições Iniciais para a Temperatura nas Simulações de 10 a 12 .....	33
Tabela 9 - Tabela de Temperatura Média a cada 100 segundos.....	34
Tabela 10 - Pontos de atendimento ao EDT no Plano Z .....	39
Tabela 11 - Pontos de atendimento a Magnitude da Velocidade $< 0,35$ m/s no Plano Z .....	39

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.1. Ventilação e Ar-Condicionado - VAC .....	11
2.2. Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD .....	14
2.3. Parâmetros para conforto térmico e qualidade do ar .....	15
3. METODOLOGIA .....	16
3.3.1. Pasta “0” .....	22
3.3.2. Pasta “Constant” .....	22
3.3.3. Pasta “System” .....	23
3.3.4. Geração da Malha .....	24
3.3.5. ParaView .....	25
4. RESULTADOS .....	25
4.1. Ventilação sem Transferência de Calor e sem modelo de turbulência.....	25
4.2. Ventilação bidimensional com transferência de calor e modelagem de turbulência	31
4.3. Ventilação tridimensional com transferência de calor e turbulência .....	39
5. CONCLUSÕES.....	41
6. TRABALHOS FUTUROS .....	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
APÊNDICE A – Ventilação tridimensional sem Transferência de Calor e sem modelo de turbulência .....	45
APÊNDICE B - 4.2. Ventilação bidimensional com transferência de calor e modelagem de turbulência	70

## 1. INTRODUÇÃO

O primeiro equipamento para condicionamento de ar foi inventado em 1902 pelo engenheiro Willis Carrier (NEVES, 2018). Sua principal função na época era promover o controle de umidade em indústrias têxtil e em gráficas. A partir daí, os equipamentos de ar-condicionado começaram a se tornar mais comuns e a terem diversas aplicações, como, hospitais em 1914 como uma forma de melhorar a umidade em salas de parto, em teatros em 1922, em lojas em 1923, cinemas em 1924. Todas essas aplicações ajudaram a difundir o ar-condicionado na sociedade.

Porém, como se tratava de um equipamento novo ele trazia consigo algumas desvantagens, a primeira era a utilização de gases tóxicos ou inflamáveis em seus sistemas, o que aumentava o risco de acidentes. Além disso, as máquinas possuíam dimensões significativas, como pode ser visto na Figura 1, onde Carrier aparece ao lado de um equipamento de ar-condicionado, o que dificultava sua instalação em residências. A primeira casa a receber um sistema de ar-condicionado foi em 1914, porém só passou a ser amplamente utilizado por volta de 1970, com a criação dos equipamentos de janela.

Figura 1. Engenheiro Willis Carrier ao lado do primeiro equipamento de ar-condicionado



Fonte: CEMEQ UFG (2018).

A partir da disseminação do ar-condicionado novos equipamentos e sistemas foram sendo criados com o objetivo de reduzir dimensões e melhorar a eficiência. Dessa forma, os sistemas de condicionamento de ar se tornaram cada vez mais acessíveis e mais pessoas passaram a utilizar, com diferentes aplicações. Porém, mesmo com todos os benefícios, existe uma série de problemas em decorrência da utilização desses equipamentos.

Um dos maiores problemas causados pela utilização do ar-condicionado está relacionada à da qualidade do ar em ambientes fechados. A maioria dos equipamentos residenciais de condicionamento de ar trabalham apenas com a recirculação de ar, sem a admissão de ar externo. Com isso, o ar do ambiente começa a ter um grande acúmulo de gases nocivos e de particulados, o que pode causar desconforto e dificuldade de respiração dos ocupantes sendo denominado como “ar viciado”.

Além do desconforto, a alta concentração de particulados e gases nocivos no ar pode desencadear uma série de problemas respiratórios, como asma, bronquite, entre além de, aumentar a disseminação de vírus e bactérias, uma vez que o mesmo ar é circulado várias vezes no mesmo ambiente.

Outro agravante para o sistema de condicionamento de ar é o consumo de energia. Segundo Song et al (2023) os equipamentos de condicionamento de ar são responsáveis pela maior demanda de energia em edificações, seguido da iluminação. Assim sendo, é necessário que todos os sistemas sejam projetados com o objetivo de maximizar sua eficiência reduzindo o consumo energético.

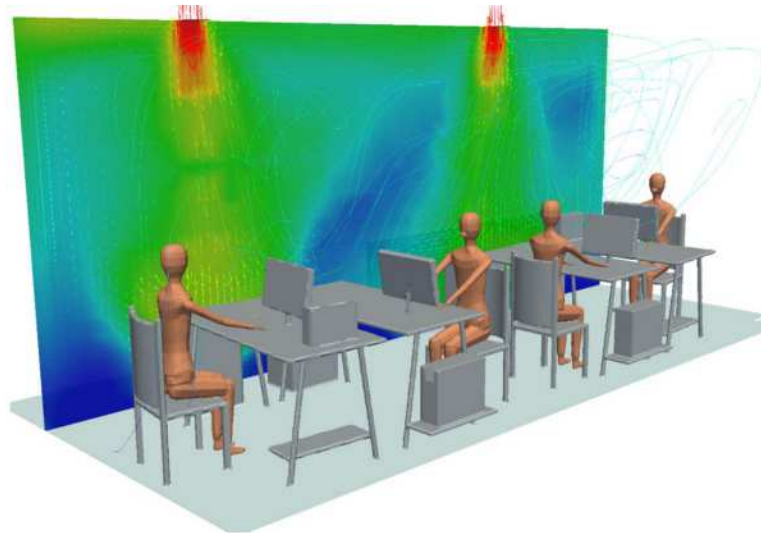
Com isso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a circulação de ar em ambiente fechados a fim de determinar a performance do sistema, atendendo os parâmetros de conforto térmico e garantindo uma boa qualidade do ar. Para isso, será utilizado a Dinâmica dos Fluidos Computacional ou, do inglês, “Computational Fluid Dynamic” (CFD).

Os estudos de CFD iniciaram em meados dos anos 70 e surgiram a partir da união entre duas diferentes áreas, a mecânica dos fluidos e o cálculo numérico (RODRIGUES, 2019). Os problemas de mecânica dos fluidos são resolvidos a partir de equações diferenciais parciais (EDP). Porém, tinham que ser resolvidas de forma manual, pois possuíam limitações nas técnicas matemáticas de resolução. Com o advento do CFD foi possível resolvê-las com o uso de métodos numéricos e computadores. Como exemplo, na Figura 2 é possível observar o resultado de uma simulação via CFD de um ambiente condicionados artificialmente por aparelhos de ar-condicionado instalados no teto de um escritório (Universidade de Minho, 2016).

As técnicas de CFD podem ser aplicadas em diferentes áreas da engenharia mecânica. Uma das principais áreas de aplicação é na aviação, para que seja possível prever o comportamento do escoamento em torno das aeronaves sem a necessidade de protótipos. Além disso, ela também é bastante aplicada na montagem de placas e componentes elétricos, para resolver

problemas de dissipação de calor e otimização do sistema. No presente trabalho, será aplicada os modelos de CFD para estudar diferentes escoamentos de ar em ambientes fechados e climatizados.

Figura 2. Simulação do Escoamento de Ar do Sistema de Ventilação



Fonte: Universidade de Minho, 2016.

A principal vantagem do CFD aplicado a problemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) é a possibilidade de testar diferentes parâmetros de entrada antes da instalação do sistema, o que permite uma economia na instalação, uma vez que o sistema pode ser otimizado. Além disso, os cálculos analíticos de carga térmica possuem diferentes fatores de segurança e aproximações que superdimensionam os sistemas de condicionamento de ar. Já com CFD é possível ter cálculos mais precisos, com o mínimo de superdimensionamento, resultando em uma redução do consumo de energia.

Para o presente trabalho será utilizado o software OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) para a modelagem e solução dos problemas de mecânica dos fluidos computacional. Foi escolhido esse programa por ser um software livre, gratuito e de código aberto (OpenFOAM, 2023).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Ventilação e Ar-Condicionado - VAC

O estudo apresentado nessa pesquisa aborda três diferentes temáticas, a qualidade do ar interna, ventilação e conforto térmico em ambientes e CFD. As três se relacionam diretamente entre si, visto que uma análise do sistema de ventilação e climatização pode ser feito com o auxílio de métodos computacionais e com isso melhorar a eficiência do sistema.

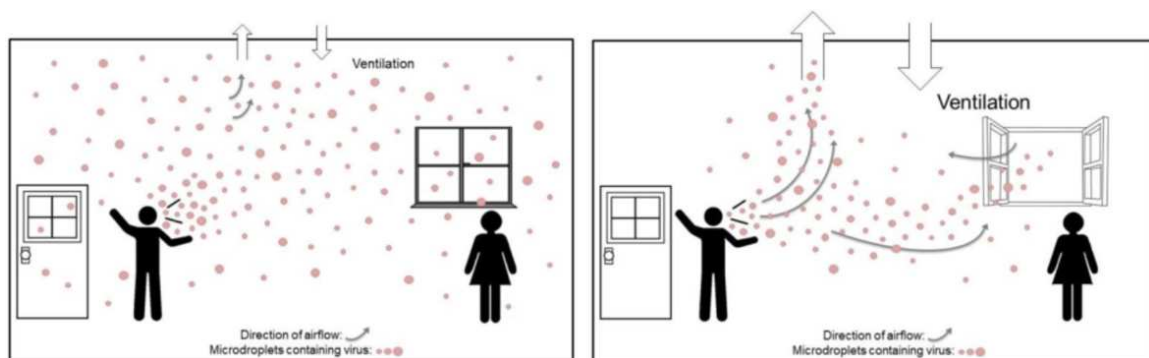
Um estudo realizado por Cao et al. (2014) foca em uma revisão bibliográfica de diferentes métodos de ventilação e como eles podem ser classificados de acordo com a aplicação desejada. Dessa forma, é primordial entender qual a aplicação antes de determinar como será o sistema de distribuição de ar, para isso Cao et al. (2014) lista cinco índices para determinar o desempenho do sistema de ventilação: taxa de renovação de ar, remoção de poluentes, remoção de calor, exposição e distribuição do ar.

A preocupação com a qualidade do ar interior vem desde o final do século XVIII, durante a revolução industrial. O aumento exponencial da poluição no ar começou a afetar diretamente a saúde dos trabalhadores, devido à grande concentração de fumaça e a falta de ventilação nas indústrias. Uma das primeiras pessoas a notar a relação entre a qualidade do ar interior e o bem-estar das pessoas foi o químico e cientista britânico Percy Frankland, no artigo "Air and Rain: The Beginnings of a Chemical Climatology".

A evidência da poluição do ar surgiu juntamente com a preocupação da disseminação de doenças relacionadas ao sistema respiratório. Nesse contexto, a pandemia ocasionada pelo vírus SARS-CoV-2 em março de 2020, aumentou de forma significativa a preocupação com a utilização de sistemas de climatização e ventilação mecânica em ambientes fechados. Segundo Noorimotlahg (2021) além dos cuidados com o distanciamento e com a correta higienização das mãos, também deve-se considerar as rotas de transmissão aérea para garantir a proteção tanto dos agentes de saúde quanto dos pacientes.

Na Figura 3, do site On Safety (2020), é possível ver a diferença que existe, na concentração de partículas, entre um ambiente fechado e um ambiente com ventilação adequada. Quando o ambiente possui uma baixa renovação de ar a tendência é a concentração de partículas aumentar de forma significativa, aumentando assim o risco e contaminação

Figura 3. Diferença entre ambiente com ventilação inadequada (imagem à esquerda) e ventilação adequada (imagem à direita).

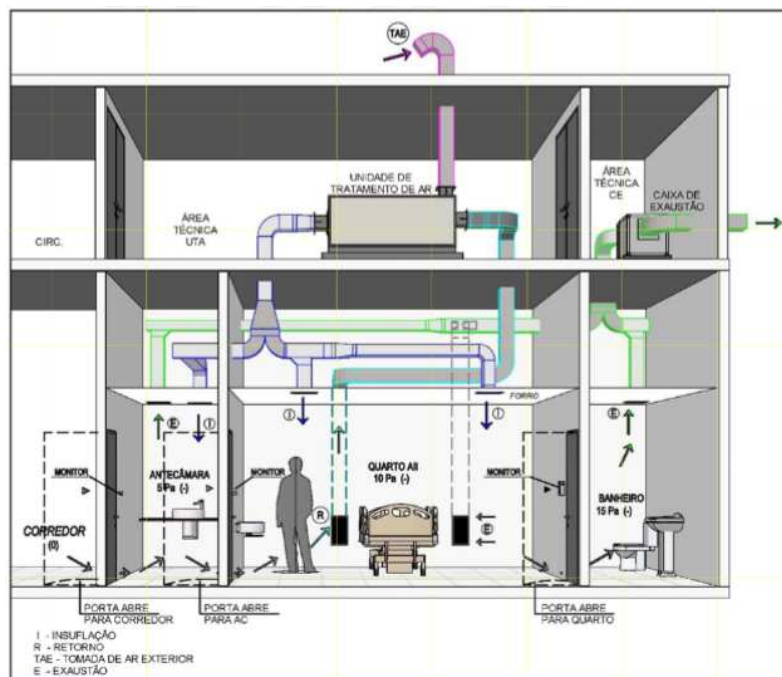


Fonte: ON SAFETY (2020)

A preocupação com a qualidade do ar deve ocorrer desde a concepção do projeto até a sua execução. Para garantir que o projeto esteja adequado aos parâmetros recomendados existe uma série de normas que determinam parâmetros para o conforto do ar, como por exemplo a ABNT NBR 7256:2022 que trata da qualidade do ar em um Estabelecimento de Assistência à Saúde (EAS). Na norma contém os principais parâmetros que asseguram a qualidade do ar interior e os seus valores de referência a serem atendidos pelo projetista. Além disso, na norma também são apresentadas diferentes soluções que podem ser aplicadas no sistema de ar condicionado, com o objetivo principal de garantir a pressão interna recomendada.

A Figura 4 apresenta um esquema para controle de pressão e de renovação de ar para um EAS que possui antecâmara. Ainda na mesma figura, destacado na cor verde, está o sistema de exaustão do ambiente, na cor magenta a captação de ar externa, na cor cian o retorno de ar e destacado na cor azul o duto de insuflamento.

Figura 4 Esquema de Exaustão e Renovação Para Controle de Pressão em EAS



Fonte: ABNT NBR 7256:2022

A ABNT NBR 16401:2008 também trata da qualidade do ar interior, focando em sistemas centrais e unitários. A NRB em questão é dividida em três partes, a primeira parte da norma é abordado o sistema de ventilação e climatização para sistemas que possuem normas específicas, como salas limpas, centros cirúrgicos, entre outros. A segunda parte são especificados os parâmetros utilizados para garantir o conforto térmico dentro de ambientes com condicionamento de ar. Porém, é importante ressaltar que o conforto térmico é subjetivo, sendo diferente para cada usuário do sistema. Dessa forma, na NBR 16401-2 é definido um

ambiente onde 80% ou mais dos ocupantes estão em conforto térmico. Por fim, na parte final da norma, é focada na qualidade do ar interno, definindo níveis de filtragem necessários, parâmetros para cálculo de renovação de ar e requisitos técnicos de projeto e manutenção para garantir a qualidade do ar interior.

## **2.2. Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD**

A Dinâmica dos Fluidos Computacional utiliza de métodos computacionais e numéricos para estudar e descrever o comportamento dos fluidos em movimento. O principal objetivo do CFD (Computational Fluid Dynamics) é simular e prever o comportamento do fluido de acordo com cada situação e as propriedades do fluido.

Os problemas de dinâmica dos fluidos são resolvidos a partir da discretização do domínio estudado em uma malha, formada por células, elementos ou volumes. Dessa forma, a solução numérica é aplicada em cada um dos volumes infinitesimais. Com isso, quanto mais refinada for a malha, ou seja, maior quantidade de volumes infinitesimais, mais próximo os resultados irão se aproximar do real. Porém, existe um alto custo computacional tanto para gerar a malha quanto para realizar as simulações com malhas mais refinadas.

Dentre os métodos para solucionar problemas que envolvam CFD, destacam-se os métodos de Volumes Finitos (FVM, “Finite Volume Method”), Diferenças Finitas e de Elementos Finitos (FEM, “Finite Element Method”). No presente trabalho, será utilizado o método de FVM de segunda ordem, onde as equações são aplicadas e resolvidas em cada volume infinitesimal do domínio.

A utilização do OpenFOAM para simular e estudar sistemas de ventilação possui uma vasta abrangência. Um exemplo é trazido por Limane et al. (2018) onde o software foi aplicado para avaliar o conforto térmico, a qualidade do ar e as trocas de calor que ocorrem no interior de uma piscina coberta. Dessa forma, com a utilização do OpenFOAM foi possível levar em consideração parâmetros como velocidade, temperatura e umidade do ar, e comprovar o desconforto térmico causado pela má ventilação do ambiente.

Além disso, o OpenFOAM também possui aplicações industriais, sendo utilizado para aumentar a eficiência dos equipamentos de ventilação. Com isso, é possível determinar o número, as dimensões e a curvatura das pás com o objetivo de melhorar a eficiência do ventilador Hocine et al (2021). A principal vantagem deste método é a desnecessidade de fabricar todos os ventiladores para testá-los, sendo necessário apenas a fabricação do modelo com maior eficiência nas simulações.

### 2.3. Parâmetros para conforto térmico e qualidade do ar

O conforto térmico de um ambiente é um parâmetro subjetivo de cada ocupante do local, pois a noção de conforto está intimamente ligada a sensação de bem-estar com as condições de condicionamento do ar do ambiente interno. Normalmente o conforto térmico é atingido quando a taxa de dissipação de calor da pessoa para o meio ambiente se iguala ao calor produzido pelo metabolismo, entrando em equilíbrio. Além disso, o conforto térmico sentido pela pessoa varia de acordo com a atividade que ela exerce e as roupas que ela utiliza (Mitchell, 2018).

Há diversos parâmetros que podem ser utilizados para determinar a qualidade do ar em interiores, os parâmetros mais comuns são temperatura, umidade, velocidade e concentração para contaminantes químicos. A Resolução-Re N° 09, de 16 de janeiro de 2003 da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) traz valores de referência para esses parâmetros, que podem ser utilizados para determinar se o sistema de climatização e ventilação está sendo efetivo. Segundo a resolução em questão, para que o ambiente possua uma boa qualidade do ar o Valor Máximo Recomendado – VMR para contaminantes químicos é de 1000 ppm de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de 80 µg/m<sup>3</sup> de aerodispersóides totais no ar.

O VMR determinado pela ANVISA para o parâmetro velocidade do ar é de 0,25 m/s, a uma altura de 1,50 m do piso, que é determinada como a zona de ocupação do ambiente. Além disso, para a temperatura e umidade a resolução leva em consideração os fatores do ambiente externo, determinando parâmetro para o verão e inverno. A umidade relativa no verão pode variar entre 40% e 60% enquanto no inverno essa variação é de 35% a 65%. Já a temperatura de Bulbo Seco deve se manter entre 23 °C e 26 °C para as condições de verão é de 20°C a 22°C para a condição de inverno.

Outro parâmetro comumente utilizado para determinar a qualidade do ar em interiores é o ADPI (*Air Diffusion Performance Index*) o qual é apresentado pela ASHRAE (2009) e propõe um índice para determinar o desempenho do sistema de distribuição de ar.

Para garantir o atendimento ao ADPI pode ser utilizado o EDT - “*Effective Draft Temperature*” o qual é baseado na velocidade do ar, na temperatura na corrente de ar, da média da temperatura de controle e da velocidade de ar do jato. Dessa forma, quando 80% do ambiente tem o EDT entre  $-1,7 \leq EDT \leq 1,1$  e a magnitude de velocidade  $U_i \leq 0,35$  m/s tem-se que o ambiente se encontra em conforto térmico. O EDT pode ser calculado de acordo com a Equação 1.

$$EDT = (T_i - T_r) - 7,66(U_i - 0,15), \quad (1)$$

onde:  $T_i$  = Temperatura em determinado ponto, em °C,  $T_r$  = Temperatura de controle do ambiente, em °C e  $U_i$  = Magnitude da Velocidade em determinado ponto, em m/s.

Para realizar o cálculo do EDT foi utilizado a ferramenta *calculator* do paraView, utilizando a temperatura mínima de referenciada pela Resolução N°09 da ANVISA de 23°C. A equação foi montada conforme apresentado na Equação 9

$$EDT = (T - 296.15) - 7,66 * (\text{sqrt}((U_x^2) + (U_y^2) + (U_z^2)) - 0,15) \quad (2)$$

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Modelo Matemático

Para que seja possível solucionar os problemas de escoamentos de ar-condicionado em ambientes fechados primeiro é importante entender quais as características do escoamento e quais são as equações que o modelam. As três principais variáveis, são temperatura, pressão e velocidade, as quais podem interferir nas propriedades do fluido, viscosidade e massa específica

No OpenFOAM existem várias opções para solucionar os mais diversos tipos de escoamentos, são os chamados algoritmos ou, no inglês, “solvers”. No presente trabalho foi utilizado o algoritmo “buoyantPimpleFoam”, o qual foi escolhido devido a potencialidade metodológica em resolver as equações da conservação de massa, de Navier-Stokes e da energia, de forma acoplada com a aproximação de Bousinesq, para simular escoamentos incompressíveis turbulentos, com modelo k-epsilon.

A equação da conservação de massa, para escoamentos incompressíveis é apresentada na Equação 3, na sua forma cartesiana (ÇENGEL E CIMBALA, 2012):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

onde:  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes da velocidade do escoamento, em [m/s] ao longo dos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$ , e  $z$  respectivamente,  $\frac{\partial}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial}{\partial y}$  e  $\frac{\partial}{\partial z}$  representam as derivadas parciais em relação às coordenadas cartesianas, respectivamente.

As equações de Navier-Stokes, representam o balanço de quantidade de movimento linear, (Eqs. 3-5), para escoamentos incompressíveis e já acopladas com aproximação de

Boussinesq, indicando que a variação da massa específica é devida apenas a variação de temperatura e a variação de massa específica ao longo do tempo, para um dado volume, e é muito menor que a massa específica média do escoamento. Dessa forma, é possível alterar apenas o termo do empuxo nas equações de Navier-Stokes, mantendo o fluido incompressível.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + g_y \beta (T - T_{ref}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

onde  $t$  é o tempo em [s],  $p$  é a pressão em [Pa],  $\rho$  é a massa específica em [kg/m<sup>3</sup>],  $\nu$  é a viscosidade cinemática em [m<sup>2</sup>/s],  $g_y$  é componente da gravidade em [m/s<sup>2</sup>] na direção  $y$ , considerada a direção vertical, nas demais direções  $g_x = g_z = 0$ ,  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica, dado por  $1/T_{ref}$ , sendo  $T_{ref} = 300$  K e  $T$  é a temperatura instantânea do escoamento, sendo dada pela solução da equação da energia, Eq. 7.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \frac{\phi}{\rho C_p}, \quad (7)$$

onde  $C_p$  é o calor específico a pressão constante,  $C_p = 1004$  J/(Kg.K),  $\alpha$  é a difusividade térmica,  $\alpha = 2,26E(-6)$  e  $\phi$  é a dissipação viscosa, dada por:

$$\phi = \mu \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}. \quad (8)$$

É utilizada a formulação transiente das equações com o objetivo de estudar o tempo necessário para que o escoamento entre em regime e dessa forma determinar qual é a performance da distribuição de ar utilizada.

### 3.2. Modelagem da Turbulência

Outra característica importante para solucionar problemas de escoamento é entender qual o regime que o escoamento se encontra, que pode ser laminar, em que o fluido escoam em camadas suaves e organizadas, sem que haja mistura entre elas (WHITE, 2011) ou o escoamento pode ser turbulento, ocorrendo de maneira desordenada, em que há mistura entre as diferentes camadas do escoamento (WHITE, 2011). Para obter o regime do escoamento, utiliza-se o número de Reynolds, Eq 9.

$$Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (9)$$

onde V é a velocidade de entrada do ar, proporcionada pelo aparelho de ar-condicionado, a qual é dada como condição de contorno no presente trabalho, L é o comprimento da abertura da entrada de ar e  $\nu = 1,552E - 5 \text{ Pa.s}$ , é a viscosidade cinemática do ar atmosférico.

Nas simulações do presente trabalho tem-se  $193 < Re < 16110$ , considerando que o escoamento é um jato de ar frio saindo do ar-condicionado, e que o número de Reynolds crítico para esse tipo de escoamento é  $Re=30$ , logo, todas as simulações são consideradas em regime turbulento. Foi considerado todo o volume como turbulento com o objeto de validar os modelos com os resultados obtidos por Youssef et al (2018).

Então, aplica-se o conceito de média temporal nas Eqs. 3, 4, 5, 6 e 7 obtendo as equações conhecidas como URANS (“Unstedy Reynolds Average Navier-Sokes” ou Navier-Stokes Média de Reynolds):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \right] + g_y \beta (\bar{T} - T_{ref}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right] - \frac{\bar{\phi}}{\rho C_p}, \end{aligned} \quad (14)$$

onde o operador barra ( $\bar{\quad}$ ) indica a média da variável no tempo,  $\nu_t$  é a viscosidade turbulenta e  $\alpha_t$  é a difusividade térmica turbulenta, calculada pelo número de Prandtl turbulento,  $Pr_t = \nu_t/\alpha_t$ , sendo  $Pr_t=0,85$  e  $p$  é a pressão modificada pela incorporação da energia cinética turbulenta.

Para obter o campo de  $\nu_t$ , no presente trabalho, adota-se o modelo de turbulência  $\kappa - \epsilon$ , que consiste em um modelo de fechamento com duas equações de balanço. Este modelo utiliza duas diferentes equações de transporte para modelar a turbulência em um escoamento. A primeira equação representa a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a segunda é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta ( $\epsilon$ ). Sendo que o modelo padrão é baseado nos conceitos apresentados por de Launder e Spalding (1974). E a equação da energia cinética turbulenta é dada por:

$$\frac{D}{Dt}(\rho\kappa) = \nabla \cdot (\rho D_\kappa \nabla \kappa) + P - \rho\epsilon, \quad (15)$$

onde  $\kappa$  é a energia cinética turbulenta,  $D_\kappa$  é a difusividade efetiva para  $\kappa$ ,  $P$  é a taxa de produção de energia cinética turbulenta e  $\epsilon$  é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. Sendo que a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta é dada por:

$$\frac{D}{Dt}(\rho\epsilon) = \nabla \cdot (\rho \nabla \epsilon D_\epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} \left( P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (16)$$

de modo que  $D_\epsilon$  é a difusividade efetiva para  $\epsilon$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes do modelo.

O Modelo de Fechamento  $\kappa - \epsilon$ , possui outras versões, sendo que no presente trabalho adota-se o modelo de fechamento  $\kappa - \epsilon - RNG$ , provindo da Teoria de Grupo de Renormalização (RNG), muito apropriada para modelar a turbulência provocada por ventilação em espaços fechados. A modificação na versão RNG está relacionada ao termo de transformação viscosa da equação de balanço de  $\epsilon$ , sendo que, o termo  $C_2$  deixa de ser trabalhado como uma constante e é adotado como uma função de natureza dinâmica:

$$c_{\epsilon 2}(\vec{x}, t) = \widetilde{c}_{\epsilon 2} + \frac{c_\mu \lambda^3 \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_o}\right)}{1 + \beta \lambda^3}, \quad (17)$$

com:

$$\lambda = \frac{k}{\epsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (18)$$

Por fim, a viscosidade turbulenta é dada por:

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon}, \quad (19)$$

no qual  $C_\mu=0,085$ ;  $\sigma_k = 0,72$ ;  $\sigma_\epsilon = 0,72$ ;  $c_{\epsilon 1} = 1,44$ ;  $c_{\epsilon 2} = 1,68$ ;  $\beta = 0,012$ ;  $\lambda_o = 4,38$ .

### 3.3. OpenFOAM

No presente trabalho será utilizado o software de código aberto OpenFOAM (2023). Esse software permite a aplicação de diferentes métodos numéricos e discretização de

domínios. O programa utiliza a linguagem C++ e não necessita de licença para ser utilizado. Além disso, por se tratar de um programa com código aberto o OpenFOAM possui diversas ferramentas e funções que são incrementadas pelos próprios usuários, o que aumenta os números de bibliotecas e métodos para solucionar os mais diversos problemas. Na Figura 5 pode ser vista uma tabela, disponível em OpenFOAM (2023), onde é indicado alguns algoritmos e as aplicações que os mesmos podem ser usados.

Figura 5. Tabela de Capacidade de Solução por Solver

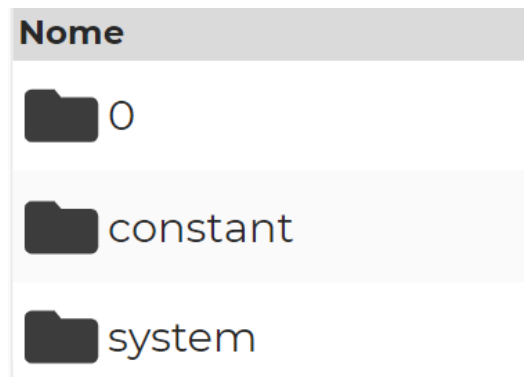
Solver	transient	compressible	turbulence	heat-transfer	buoyancy	combustion	multiphase	particles	dynamic mesh	multi-region	fOptions
boundaryFoam											
buoyantPimpleFoam	✓	✓	✓	✓	✓						✓
buoyantSimpleFoam		✓	✓	✓	✓						✓
chemFoam	✓			✓		✓					
chtMultiRegionFoam	✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓
coldEngineFoam	✓	✓	✓	✓		✓			✓		✓
engineFoam	✓	✓	✓	✓		✓			✓		✓
fireFoam	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓
icoFoam	✓										

Fonte: OpenFOAM (Editado, 2023)

A maior dificuldade do software é a falta de uma interface amigável para configuração dos problemas e das simulações. Ao invés disso, o programa é composto por uma série de pastas e arquivos de texto onde são definidas as malhas, métodos de discretização, condições de contorno, condições iniciais, parâmetros da simulação e propriedade do fluido.

Existem três principais pastas no OpenFOAM, que são mostradas na Figura 6.

Figura 6. Pastas Iniciais OpenFOAM

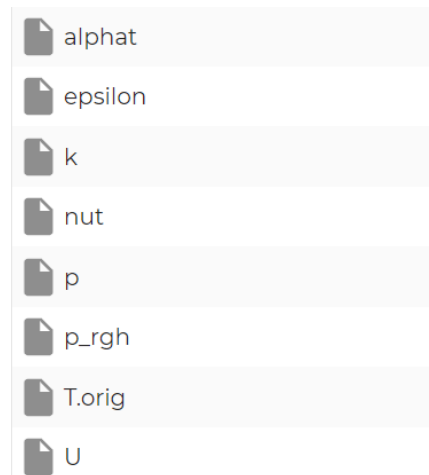


Fonte: Autor

### 3.3.1. Pasta “0”

Na pasta “0” (Figura 7) contém as condições iniciais, no tempo “0”, de Velocidade (U), Temperatura (T), Pressão (P) e a pressão absoluta (p\_rgh). Além disso, quando se utiliza modelos de turbulência existem outras condições iniciais que devem ser determinadas, são elas: da difusividade turbulenta (alpha), da taxa de dissipação de energia (épsilon), da energia cinética turbulenta (k) e da viscosidade cinemática turbulenta (nut).

Figura 7. Pasta de Tempo 0



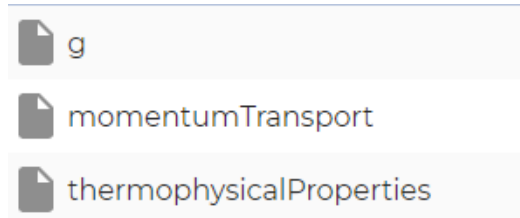
Fonte: Autor

### 3.3.2. Pasta “Constant”

Na pasta “Constant” ,Figura 7, são mostradas quais propriedades do fluido estão sendo simulado. Os arquivos utilizados são para determinar o vetor gravidade (g), a quantidade de movimento linear (momentumTransport), onde é possível inserir qual o método de turbulência que está sendo utilizado e por fim, quais as propriedades termofísicas do fluido (thermophysicalProperties).

No arquivo das propriedades deve ser escolhidas as equações de estado que será utilizada. As propriedades indicadas são a massa específica do fluido ( $\rho_0$ ), a temperatura de referência ( $T_0$ ), o coeficiente de expansão térmica ( $\beta$ ), o calor específico a volume constante ( $C_v$ ), a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), o número de Prandtl ( $Pr$ ) e a difusividade térmica ( $DT$ ).

Figura 8. Pasta de Constant

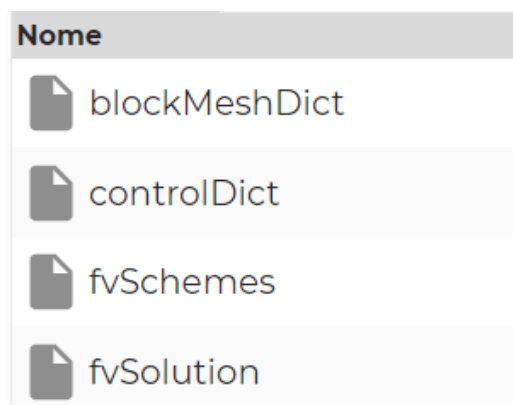


Fonte: Autor

### 3.3.3. Pasta “System”

A pasta “system”, Figura 9, é utilizada para indicar os parâmetros da simulação computacional. Nesta pasta contém quatro arquivos, “blockMeshDict”, onde é construída a malha, “controlDict”, o algoritmo para solução das equações de Navier-Stokes, além dos tempos de início e término da simulação, o passo de tempo e o do intervalo de escrita de arquivos. No arquivo “fvSchemes”, é possível configurar o método de avanço temporal e os métodos de interpolação necessários na discretização do método dos volumes finitos. Já o último arquivo é o “fvSolution”, onde são impostas as tolerâncias das soluções dos sistemas lineares escolhidos no “fvSchemes”.

Figura 9 Pasta System



Fonte: Autor

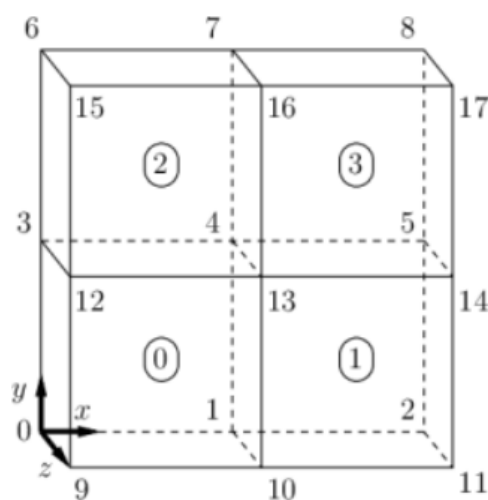
### 3.3.4. Geração da Malha

A malha padrão gerada pelo OpenFOAM utiliza de um sistema de blocos para ser construída, ou seja, são especificados vários blocos, que quando unidos formam o volume de controle a ser estudado, vide Figura 10, a qual contém um volume a ser estudado o qual é dividido em quatro blocos.

O primeiro passo para se construir a malha no OpenFOAM é entender como o arquivo *blockMeshDict* está dividido. Este é segmentado em três diferentes partes, sendo que na primeira parte, denominada de *vertices* os valores dos vértices dos blocos são inseridos em coordenadas de coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Os vértices são numerados a partir do zero de acordo com a ordem que são inseridos no documento.

A segunda parte do arquivo é denominada *blocks*. É nessa parte do arquivo em que os blocos são montados. Além disso, é nela que é definida o refinamento da malha e se ela será uniforme ou variável.

Figura 10 - Exemplo OpenFOAM



Fonte: OpenFOAM, 2023

E a última parte do arquivo é a *boundary*, onde são nomeadas todas as faces do problema em que deve ser imposta uma condição de contorno, destaca-se que as faces que possuem a mesma condição de contorno podem ser agrupadas e nomeadas de uma única forma. É importante ficar atento aos nomes que são escolhidos, pois os mesmos devem ser utilizados em todas as condições de contorno que são impostas na pasta Tempo “0” (zero).

### 3.3.5. ParaView

Para poder analisar os dados obtidos pelos OpenFOAM é necessário utilizar um segundo software exclusivo para essa análise. No relatório em questão foi utilizado o software livre, aberto e gratuito ParaView.

O ParaView é um software de visualização e análise de dados científicos e de engenharia, fornecendo recursos avançados para processar e explorar dados em 3D. Suas funções principais incluem visualização interativa, renderização avançada com efeitos visuais, suporte a diversos formatos de dados, análise de dados com corte, fatiamento e filtragem, além da medição de propriedades do campo

O ParaView é frequentemente utilizado em conjunto com softwares de simulação numérica, como o OpenFOAM, para importar e visualizar resultados de simulações de dinâmica de fluidos, permitindo compreender de forma clara e intuitiva campos de velocidade, pressão, temperatura e outras grandezas físicas em simulações complexas.

## 4. RESULTADOS

Durante o desenvolvimento do presente estudo foram realizadas simulações que variaram condições de contorno, condições iniciais e as propriedades do fluido.

### 4.1. Ventilação sem Transferência de Calor e sem modelo de turbulência

O primeiro conjunto de simulações ocorreu com o objeto de estudar principalmente o comportamento do ar insuflado em um ambiente fechado, sem a influência da transferência de calor. Para a primeira sequência de resultados foi considerado uma sala fechada tridimensional, com insuflamento de ar e sem transferência de calor. A vazão de insuflamento foi de  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $450 \text{ m}^3/\text{h}$ ), valor obtido por Crispim (2020) a partir do cálculo de 100% de renovação de ar em um consultório odontológico.

Primeiramente, foi considerado apenas uma entrada e uma saída de ar na sala, ambas com  $0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$ . O insuflamento ocorreu perpendicular ao teto, ou seja, as componentes  $u = w = 0 \text{ m/s}$  e  $v = -0,50 \text{ m/s}$ . Em seguida foi acrescentado um segundo local de insuflamento, também no teto da sala. Com o objetivo de manter a vazão de ar constante no ambiente a velocidade foi reduzida para  $v = -0,25 \text{ m/s}$  em cada local de insuflamento. Por fim, na terceira simulação volta-se a um único ponto de insuflamento, porém o insuflamento é realizado a  $45^\circ$  em relação a superfície do teto do ambiente. Da mesma forma que as demais simulações, para manter a

vazão da sala, foi imposta as condições  $u = 0,5/\sqrt{2}$  e  $v = -0,5/\sqrt{2}$  m/s. Na Tabela 1 e Tabela 2 é estão as condições de contorno impostas nas superfícies de insuflamento de ar.

A malha construída para realizar as simulações é composta de 336 pontos que formam 175 blocos, que foram unidos para formar o domínio de cálculo de forma a representar o consultório odontológico utilizado no trabalho de Crispim (2020), o qual tem as seguintes dimensões, 3,5 m x 2,5 m x 2,5 m (Comprimento x Profundidade x Altura) como mostra a Figura 11.

Tabela 1. Condições de Contorno Para a Velocidade

Fronteira	Condições de Contorno
Inlet	fixedValue
Outlet	zeroGradient
fixedWall	noSlip

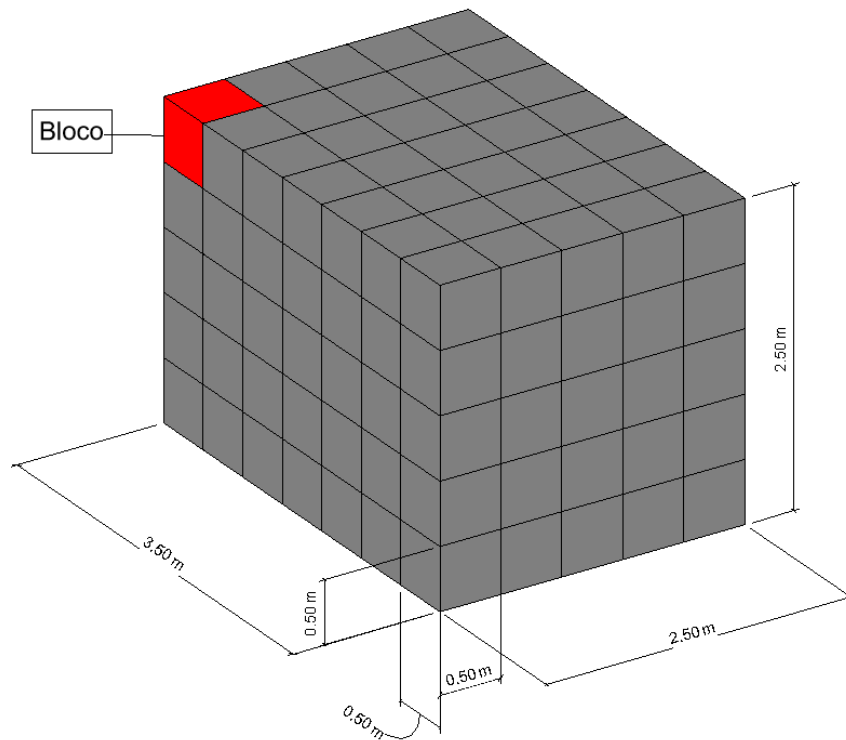
Fonte: Autor

Tabela 2 Condições de Contorno Para a Pressão

Fronteira	Condições de Contorno
Inlet	zeroGradient
Outlet	fixedValue
fixedWall	zeroGradient

Fonte: Autor

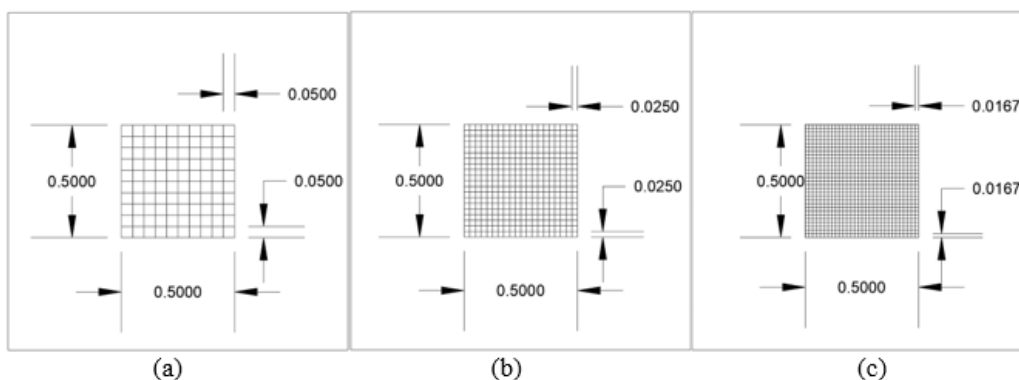
Figura 11. Representação do Domínio de Cálculo



Fonte: Próprio autor

Com o objetivo de obter resultados mais precisos e a convergência das simulações, são utilizados três diferentes níveis de refinamento. No primeiro refinamento cada subdomínio da Figura 11 foi subdividido em 10 partes iguais nas três direções X, Y e Z. Para o segundo refinamento a divisão foi em 20 partes iguais por bloco e o último nível de refinamento utilizado foi em 30 divisões, Figura 12.

Figura 12. Refinamento de 1 bloco dos 175 apresentados na Figura 11 (a) malha refinada com  $\Delta x=0,050$  m (b) malha refinada com  $\Delta x=0,025$  m e (c) malha refinada com  $\Delta x = 0,0167$ m.



Fonte: Próprio autor.

Com isso se tem um total de nove simulações, que podem ser resumidas conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Conjunto de simulações realizadas no primeiro estudo

<b>Simulação</b>	<b>Malha (Tamanho do <math>\Delta x</math>)</b>	<b>Seção de Insuflamento</b>
<b>Simulação 01</b>	0,0500	Entrada única
<b>Simulação 02</b>	0,0250	Entrada única
<b>Simulação 03</b>	0,0167	Entrada única
<b>Simulação 04</b>	0,0500	Entrada Dupla
<b>Simulação 05</b>	0,0250	Entrada Dupla
<b>Simulação 06</b>	0,0167	Entrada Dupla
<b>Simulação 07</b>	0,0500	Entrada a 45°
<b>Simulação 08</b>	0,0250	Entrada a 45°
<b>Simulação 09</b>	0,0167	Entrada a 45°

Fonte: Próprio autor.

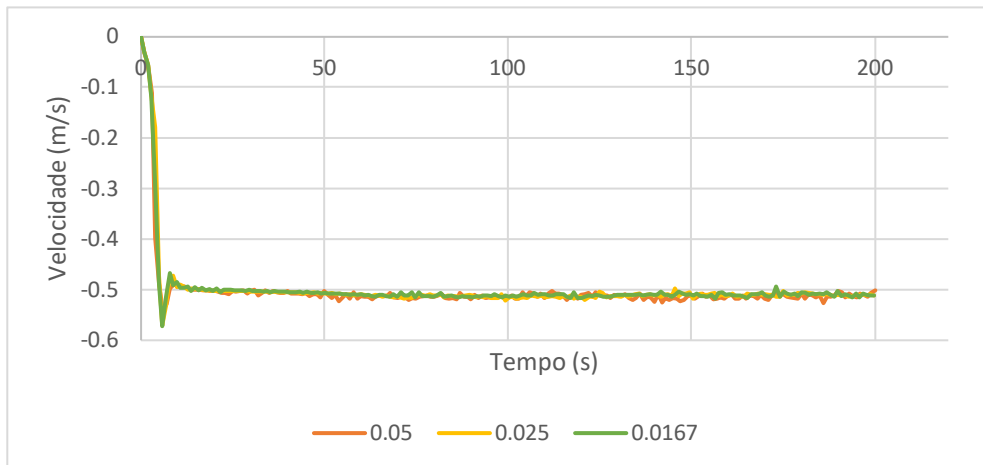
Para solucionar as simulações propostas foi utilizado o solver *icoFoam*, o qual é indicado para solucionar escoamentos incompressíveis, transientes para fluidos newtonianos com propriedades físicas (massa específica e viscosidade cinemática) constantes.

Visto que o escoamento ocorre em um ambiente tridimensional não é possível determinar o momento em que o escoamento entra em regime. Em vez disso, é determinado o momento em que o escoamento entra em um regime estatisticamente independente, isso quer dizer que a média e o desvio padrão das variáveis velocidade e pressão são independentes do tempo.

Para determinar esse instante a simulação foi realizada de 0 a 200 segundos físicos. Neste intervalo de tempo traça-se a evolução temporal da velocidade na posição  $x = 1,75$  m,  $y=1,25$ m,  $z=1,25$ m para as simulações 01, 02 e 03 (da Tabela 3) e o resultado é mostrado na Figura 13.

A partir da Figura 13 é possível calcular a média da componente velocidade  $v$  e com isso determinar se a simulação entrou em um regime estatisticamente independente. Para isso, nota-se que a variação da velocidade se tornou mínima a partir de 50 s. Portanto, é possível fazer a média a cada 25 s entre o intervalo de tempo de 50 e 200 segundos e constatar que o escoamento entrou em um regime estatisticamente, como mostrado na Tabela 4.

Figura 13 - Componente de velocidade v em m/s, nas posições x=1,75 m, y=1,25 m e z=1,25 m, para as simulações 1, 2 e 3 da Tabela 3.



Fonte: Próprio autor.

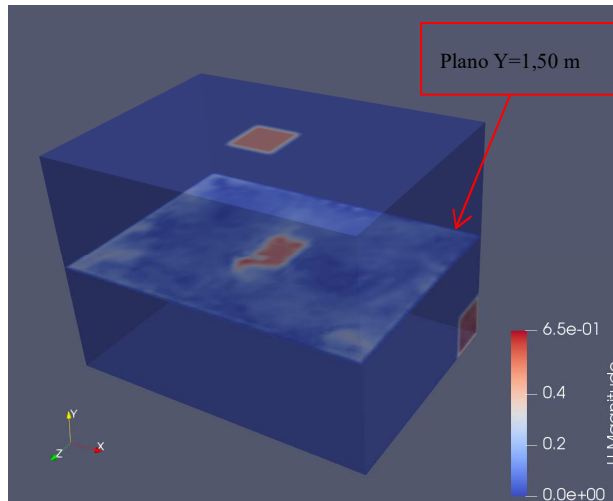
Tabela 4 - Velocidade média do escoamento a cada 25 segundos para a simulações 1, 2 e 3 da Tabela 3

<b>Tempo</b>	<b><math>\Delta x = 0,0500</math></b>	<b><math>\Delta x = 0,0250</math></b>	<b><math>\Delta x = 0,0167</math></b>
<b>50-75</b>	0,51388	0,51167	0,50988
<b>75-100</b>	0,51426	0,51312	0,51284
<b>100-125</b>	0,51148	0,51419	0,51168
<b>125-150</b>	0,51052	0,51412	0,51028
<b>150-175</b>	0,51412	0,51041	0,51039
<b>175-200</b>	0,51190	0,50993	0,50963

Fonte: Autor.

A partir do primeiro conjunto, composto das simulações de 1 a 9 foi possível analisar a interferência da posição do insuflamento como quantidade de pontos afeta o conforto dentro do ambiente. Utilizando o software Paraview foi possível traçar um plano (x,z) com y=1,50 m, com o objetivo de abranger toda a zona ocupada do ambiente, vide Figura 14, e mais dois planos adjacentes a 1,25 m e o outro a 1,75 m..

Figura 14 - Representação da Zona de Ocupação



Fonte: Autor

Dessa forma, retirando as medidas de velocidade das paredes do domínio de cálculo, uma vez que elas são nulas, é possível calcular a média da componente velocidade U para cada plano traçado. As médias obtidas podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 - Média da componente velocidade U e velocidade resultante para as simulações de 1 a 9 para diferentes valores de y no plano (xz)

Simulação	y	Componente de velocidade v (m/s)	Velocidade resultante (m/s)
1	1,75	0,018776169	0,102901442
	1,5	0,019322214	0,10432114
	1,25	0,020210603	0,105351755
2	1,75	0,015522696	0,109242651
	1,5	0,01641861	0,108510849
	1,25	0,016826051	0,110548199
3	1,75	0,014692808	0,099438813
	1,5	0,015016336	0,104911413
	1,25	0,015012282	0,118681814
4	1,75	0,016457786	0,072311594
	1,5	0,01689416	0,075513087
	1,25	0,017166488	0,075428611
5	1,75	0,029942204	0,077589182
	1,5	0,031805345	0,078595365
	1,25	0,015266009	0,076922713
6	1,75	0,014423857	0,068527694
	1,5	0,014452453	0,072535887
	1,25	0,014538347	0,075807343

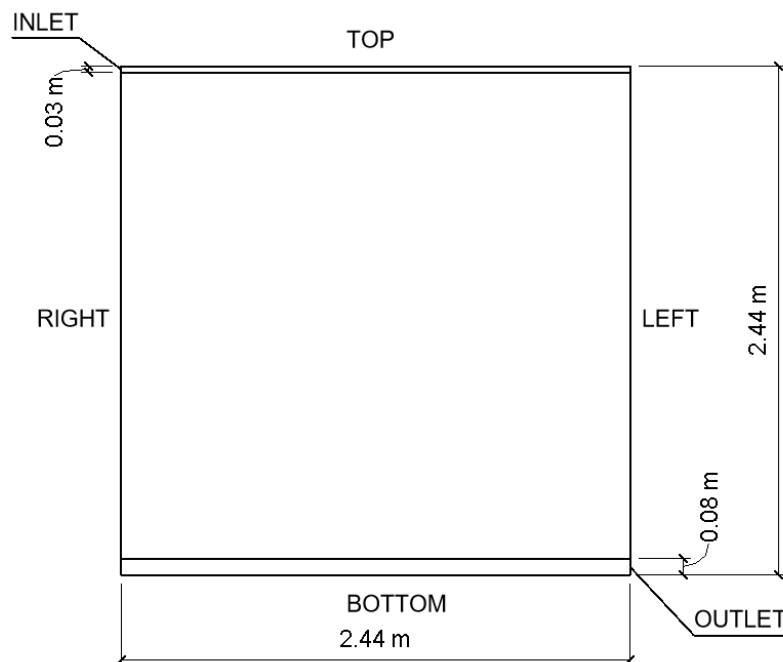
Fonte: Autor

## 4.2. Ventilação bidimensional com transferência de calor e modelagem de turbulência

O segundo conjunto de simulações levou em consideração os efeitos de transferência de calor e do fenômeno da turbulência que ocorrem devido ao jato de ar. É importante acrescentar esses parâmetros nas simulações pois eles influenciam diretamente o comportamento do escoamento.

Os parâmetros para a simulação foram obtidos a partir do trabalho de referência do Youseff et al (2018) com o objetivo de validar os modelos apresentador no presente trabalho. Foi utilizado um domínio de cálculo com 2,44 m x 2,44 m em duas dimensões. O insuflamento de ar foi realizado em uma abertura de 3,0 cm na parte superior da lateral do domínio. Já o escape de ar foi realizado por uma abertura de 8,0 cm na parte inferior da lateral oposta. Um esquema do domínio de cálculo pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Representação dos Contornos da Malha Utilizada nas Simulações de 10 a 12



Fonte: Autor

Para indicar a carga térmica a qual o ambiente está sujeito foi acrescentado um fluxo de calor positivo nas paredes do ambiente indicadas na Figura 15 como Right e Left. Esse fluxo representa a taxa de calor que atravessa as paredes devido à incidência solar.

A malha utilizada foi construída a partir de 50 vértices, que formaram um total de 16 subdomínios. A partir dessa malha, foram realizadas três simulações com diferentes valores para o volume infinitesimal. O refinamento utilizado para cada simulação está na Tabela 6.

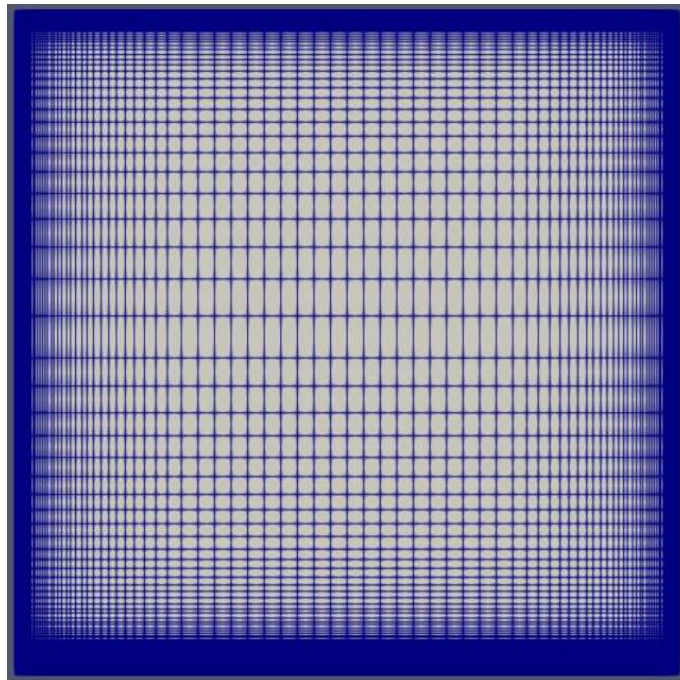
Além disso, foi realizado um refinamento específico próximo as paredes da malha. Esse refinamento tem o objetivo de melhorar os resultados obtidos próximos a parede do volume de controle devido a formação da camada limite. Na Figura 16 pode ser visto uma imagem da malha utilizada na Simulação 12. Já na Tabela 6 é possível ver a faixa de variação do volume de controle para o refinamento da malha

Tabela 6 - Conjunto de simulações realizadas no segundo estudo

Simulação	Malha (Tamanho do $\Delta x$ )
Simulação 10	0,007 a 0,22
Simulação 11	0,003 a 0,11
Simulação 12	0,002 a 0,05

Fonte: Autor

Figura 16. Malha utilizada na Simulação 12 da Tabela 6.



Fonte: Autor

Em modelos mais complexos de escoamento como o apresentado acima, tem-se a necessidade de determinar um número maior de condições de contorno e de condições iniciais. Para as paredes da frente e do fundo domínio foi utilizado a condição de contorno “empty”, a qual anula a respectiva direção, especificamente, no presente conjunto de simulações o problema se torna bidimensional.

Para a difusividade térmica ( $\alpha$ ) foi imposta a condição *compressible::alphiatWallFunction* que é utilizada nas paredes sólidas do domínio de simulação, onde há a presença de turbulência. Essa condição é baseada na lei de von Kármán-

Prandtl, relacionando a viscosidade cinemática turbulenta com o gradiente de velocidade que é formado próximo a parede. A dissipação turbulenta de energia (Epsilon) nas paredes da simulação é calculada a partir da condição de *epsilonWallFunction*. Assim como a condição para a viscosidade cinemática, ela utiliza os modelos de von Kármán-Prandtl para determinar a dissipação de energia nas paredes.

A energia cinética turbulenta (K) é definida a partir da função *kqRWallFunction* e determina qual é a dissipação de energia por unidade de massa no fluxo de ar presente. Já a viscosidade turbulenta (*nut*) foi utilizada a condição de *nutUWallFunction*, que calcula o valor de *nut* com base na velocidade próxima a parede para modelar a transferência de quantidade de movimento turbulenta próxima a superfície.

A diferença de pressão é definida como um valor fixo igual a zero no na região de extração do domínio. . Nas demais paredes a pressão é determinada a partir do próprio OpenFOAM. A velocidade é imposta como um valor fixo apenas na região de entrada de ar, enquanto nas demais paredes é imposta uma condição de não deslizamento, igual a zero. A velocidade de entrada imposta em cada simulação está na Tabela 7.

Tabela 7 - Velocidade na entrada do ar para as simulações de 10 a 12

<b>Simulação</b>	<b>Velocidade m/s</b>
<b>Simulação 10</b>	0,8
<b>Simulação 11</b>	0,8
<b>Simulação 12</b>	0,8

Fonte: Autor

Por fim, a temperatura nas paredes é determinada a partir do fluxo de calor, com o objetivo de simular a carga térmica a qual o ambiente está sujeito. Para impor esse fluxo foi utilizado a condição de *fixedGradient*, Tabela 8.

Tabela 8 - Condições de Contorno e Condições Iniciais para a Temperatura nas Simulações de 10 a 12

<b>Face</b>	<b>Condição de Contorno</b>	<b>Valor Imposto (K)</b>
Front and Back	Empty	-
Top	fixedGradient	950,57
Bottom	fixedGradient	2281,37
Left	fixedGradient	950,57
Right	fixedGradient	950,57
Inlet	fixedValue	287,15
Outlet	zeroGradient	-

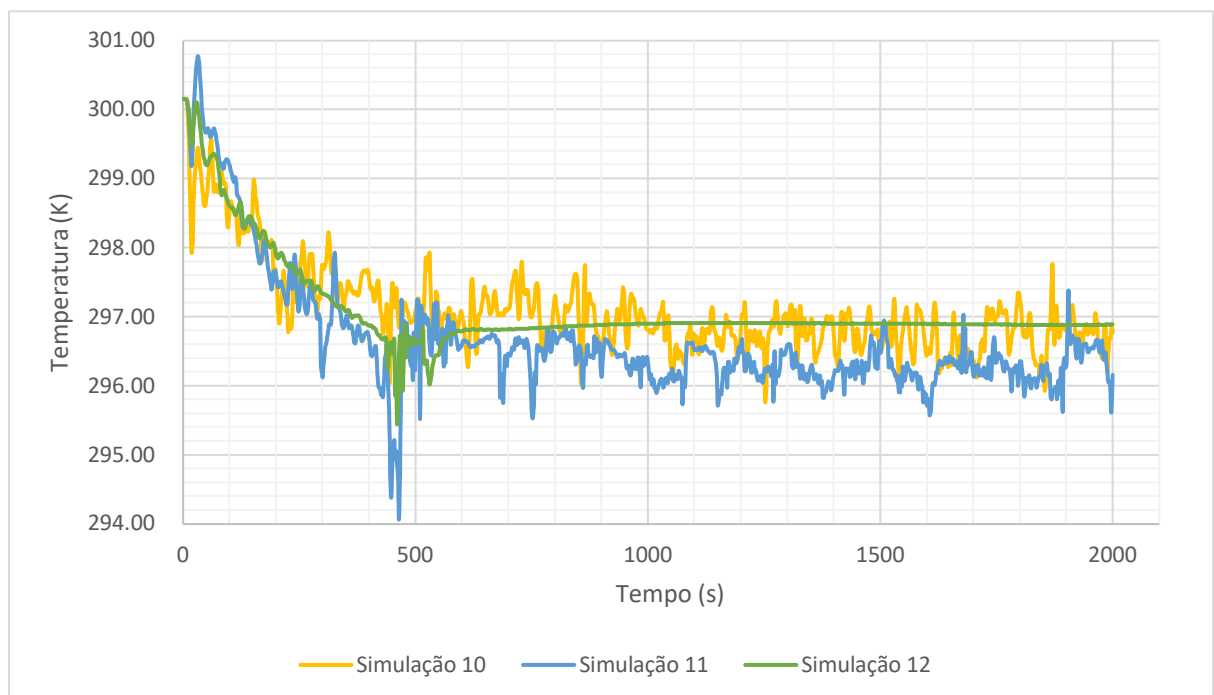
Fonte: Autor

Para a solução dos problemas apresentados no segundo conjunto de simulações foi utilizado o solver *bouantPimpleFoam*, visto que o tutorial do OpenFOAM para problemas que possuem turbulência e transferência de calor, como mostra na Figura 5.

Assim como as simulações realizadas no tópico anterior, não se pode definir um valor exato de tempo para determinar onde o sistema entrou em equilíbrio. Dessa forma, a simulação foi realizada de 0 a 2000 segundos. Os dados obtidos para a variação da temperatura podem ser vistos na Figura 17.

Dessa forma, visualmente é possível notar uma estabilidade na variação da temperatura a partir do instante  $T = 1000$  s, principalmente quando a malha mais refinada é analisada. Com isso, foi possível construir a Tabela 9 com a média de temperatura a cada 100 segundos, a partir do instante de tempo 1000 s. Com isso, pode-se ver que a variação na temperatura é menor que 0.50 K, garantindo assim que o sistema entrou em regime estaticamente independente.

Figura 17 – Média da Temperatura T, na posição  $x= m, y= m, z= m$ , para as simulações de 10 a 12



Fonte: Autor

Tabela 9 - Tabela de Temperatura Média a cada 100 segundos

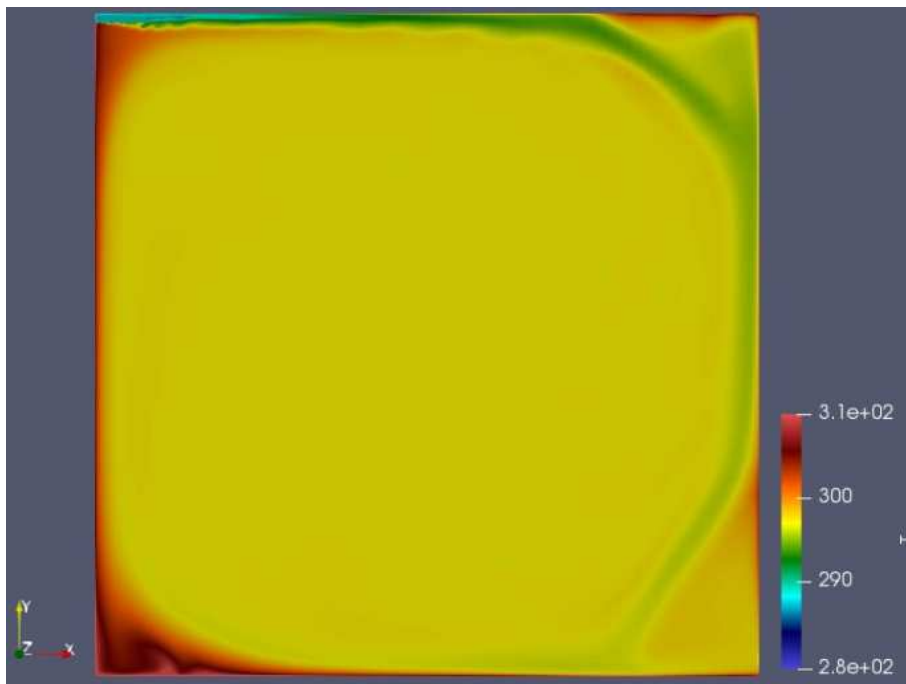
Tempo (s)		Temperatura (K)		
		Simulação 10	Simulação 11	Simulação 12
1000	1100	296,68	296,18	296,91
1100	1200	296,73	296,35	296,91

1200	1300	296,78	296,28	296,91
1300	1400	296,81	296,18	296,91
1400	1500	296,76	296,29	296,90
1500	1600	296,51	296,26	296,89
1600	1700	296,52	296,26	296,89
1700	1800	296,83	296,26	296,89
1800	1900	296,70	296,09	296,88
1900	2000	296,76	296,50	296,88
	Máxima (K)	296,83	296,50	296,91
	Mínima (K)	296,51	296,09	296,88
	Varição	0,31	0,42	0,03

Fonte: Autor

Na Figura 18 é possível ver o comportamento da temperatura para o insuflamento de ar no ambiente interno.

Figura 18 - Campo de temperatura do escoamento da Simulação 12 (Tabela 6) no instante T=2000s



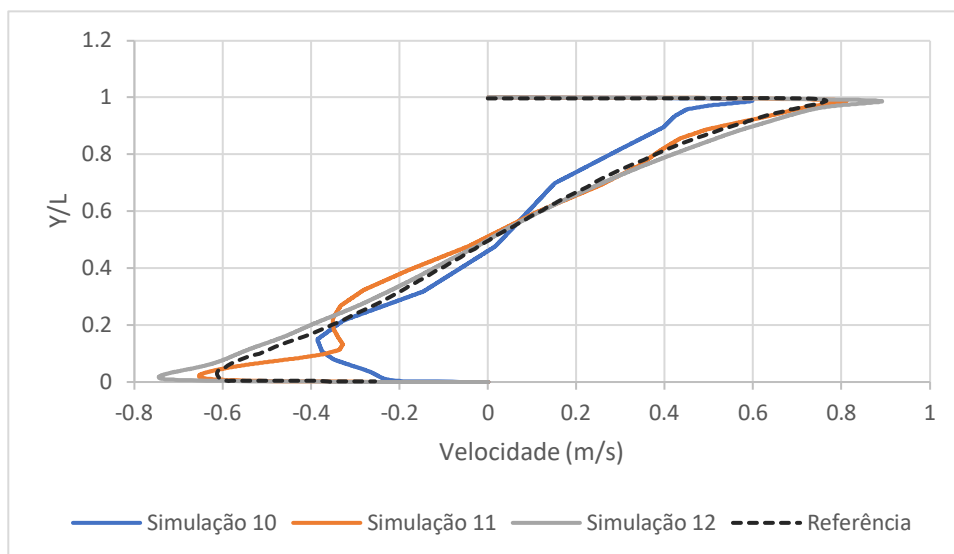
Fonte: Autor

Para o segundo conjunto, formado pelas simulações 10, 11 e 23, foi utilizado como referência o trabalho realizado pelo Youssef et al (2018) e foi traçado o perfil de velocidade vertical no centro da sala, Figura 19. Considerou-se a convergência do modelo, visto que os resultados obtidos comparados com os resultados de referência foram condizentes.

Além disso é possível notar que existe uma variação na velocidade entre  $-0,8$  m/s e  $0,9$  m/s. Os picos de velocidade ocorrem próximas ao teto e ao piso do ambiente, que são zonas

não ocupadas da sala. Já no centro da sala a velocidade se mantém na faixa de -0,4 a 0,4 m/s. Um dos motivos para essa maior velocidade na proximidade das paredes é devido ao efeito coandã. Esse efeito faz o jato de ar se aderir a superfícies planas, como o teto do ambiente e com isso é possível aumentar o alcance do sistema de ventilação. A adesão do ar ao teto ocorre devido a uma diferença de pressão entre o ar que está sendo insuflado e a camada limite. A pressão é em decorrência da aceleração do ar no teto, que causa uma queda de pressão na região.

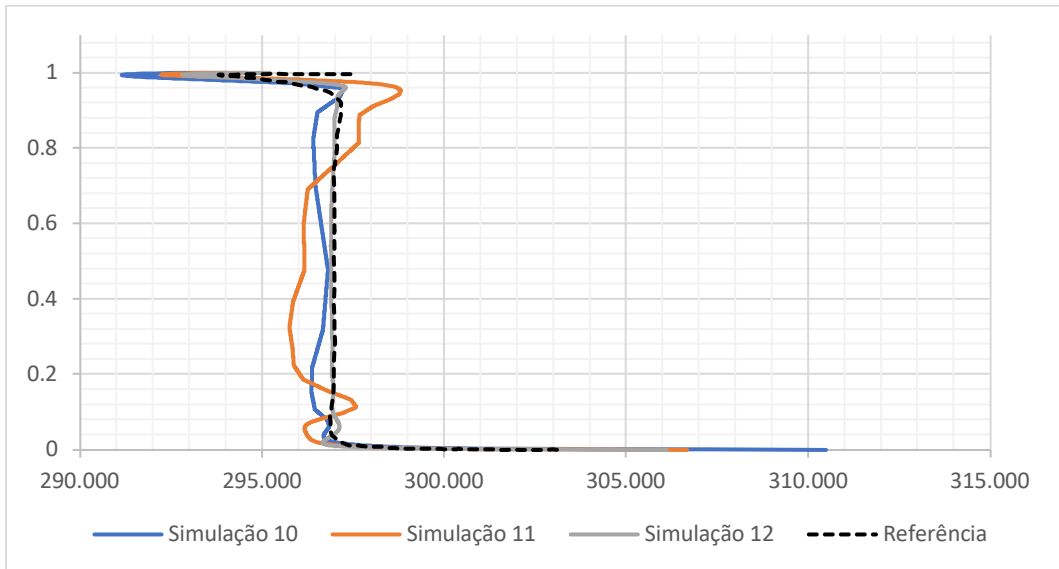
Figura 19 - Perfil de Velocidade Para Diferentes Refinamentos de Malha e Velocidade



Fonte: Autor

O perfil da temperatura ao longo da sala, Figura 20, permite notar que a maior variação de temperatura ocorre também no teto e no piso da sala. Essa maior variação de temperatura está ligada diretamente ao fato de haver fluxo de calor entrando nas condições de contorno. Além disso, próximo as paredes é onde há a maior velocidade portanto, tem-se uma maior taxa de convecção, o que contribui para a transferência de calor no meio.

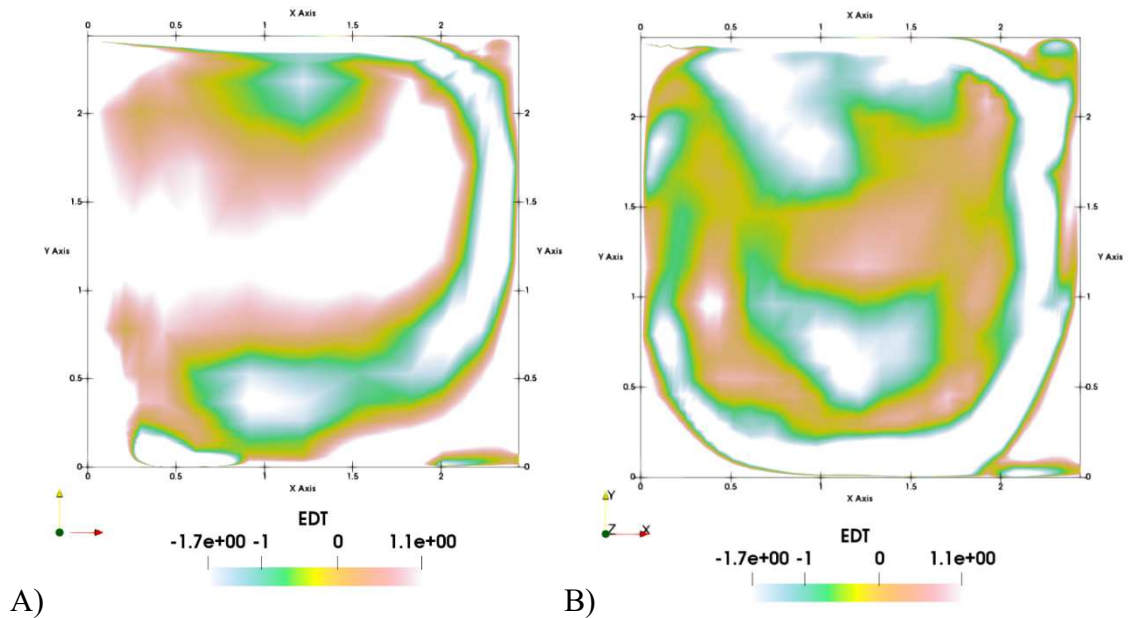
Figura 20 - Perfil de Temperatura Para Diferentes Refinamentos de Malha

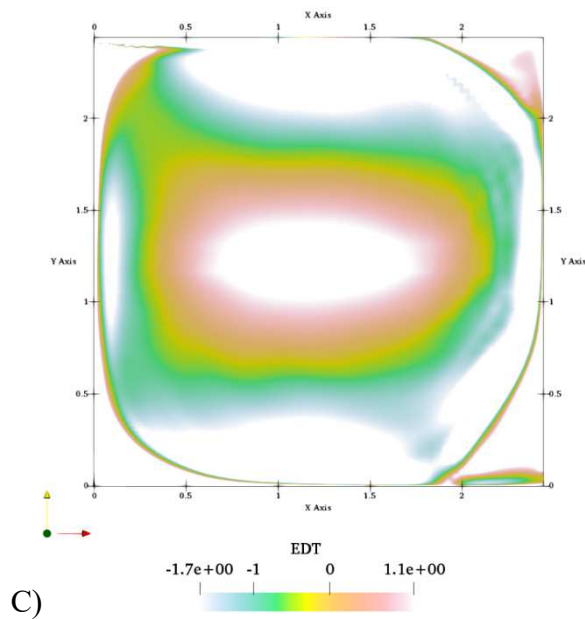


Fonte: Autor

Dessa forma, utilizando a ferramenta *Mapping Data* foi possível demarcar as regiões do domínio que atendem a faixa de conforto térmico, entre  $-1,7 < EDT < 1,1$ . Essa representação pode ser vista na Figura 21, onde as regiões vazias representam os locais da sala que estão fora do conforto térmico.

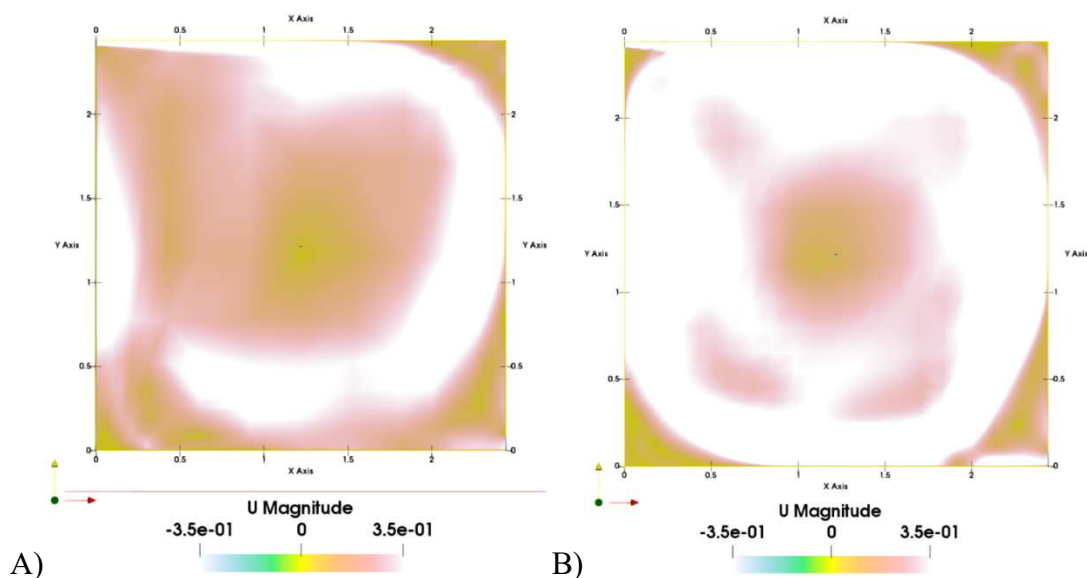
Figura 21 - Representação Gráfica do EDT entre -1,7 e 1,1 para as simulações: A) Simulação 10, B) Simulação 11 e C) Simulação 12.

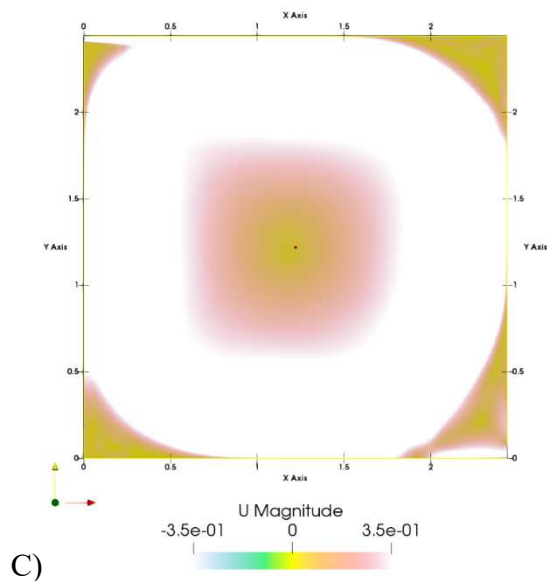




O campo de velocidade do ambiente, é mostrada na Figura 22, na qual a menor velocidade é representada pela coloração rosa e a maior velocidade pela coloração branca. Observa-se que a menor velocidade ocorre no centro do domínio, portanto o ambiente simulado pode ser considerado confortável termicamente, visto que segundo a ASHARE 2009 é necessário que 80% da sala esteja a uma velocidade inferior a 0,35 m/s para que o ambiente seja considerado confortável termicamente.

Figura 22 - Representação Gráfica da velocidade entre -0,35 e 0,5 m/s para as simulações: A) Simulação 10, B) Simulação 11 e C) Simulação 12.





Para a análise analítica dos dados foi traçado um plano paralelo a Z no centro do ambiente, a partir desses dados foi possível encontrar todos os pontos onde há o atendimento do EDT e da magnitude da velocidade do ar. Os valores obtidos estão presentes nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Pontos de atendimento ao EDT no Plano Z

<b>Simulação</b>	<b>Número Total de Pontos</b>	<b>Número de Pontos <math>-1,7 &lt; EDT &lt; 1,1</math></b>	<b>Atendimento</b>
Simulação 10	1215	321	29%
Simulação 11	4895	1541	33%
Simulação 12	19293	4605	24%

Fonte: Autor

Tabela 11 - Pontos de atendimento a Magnitude da Velocidade  $< 0,35$  m/s no Plano Z

<b>Simulação</b>	<b>Número Total de Pontos</b>	<b>Número de Pontos <math>U &lt; 0,35</math> m/s</b>	<b>Atendimento</b>
Simulação 10	1215	837	69%
Simulação 11	4895	2682	55%
Simulação 12	19293	10541	55%

Fonte: Autor

Por rigorosidade da norma, seria necessário remover os volumes de medição que estão a 30 centímetros das paredes. Porém, para os dados obtidos só foi desconsiderado os volumes da própria parede, onde a magnitude da velocidade era igual a zero.

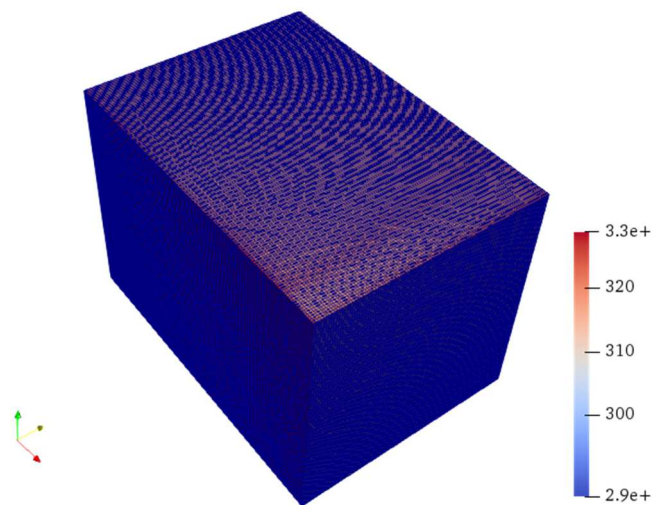
### 4.3. Ventilação tridimensional com transferência de calor e turbulência

Por fim, a simulação 13 foi realizada considerando um modelo completo tridimensional, com transferência de calor e turbulência. A malha utilizada para essa simulação foi a mesma malha utilizada para as simulações apresentadas no Item 4.1 deste trabalho, Figura

11. O refinamento foi realizado de forma uniforme, com cada volume finito possuindo dimensões de x, y e z igual a 0,025m. A representação malha pode ser vista na Figura 23.

Para resolver o problema em questão foi utilizado o mesmo solver e aproximações que foram utilizados nas simulações do Item 4.2. Dessa forma, é possível analisar de forma integrada a influência de todos os parâmetros no escoamento do fluido.

Figura 23 - Representação da Malha para a Simulação 13



Fonte: Autor

As condições de contorno também seguiram as mesmas utilizadas nas simulações de 10 a 12, porém em vez de utilizar a condição de contorno “*empty*” nas fronteiras *front and back* foi aplicado as mesmas condições das demais paredes (*left e righth*), se aproximando ainda mais de um escoamento real. Além disso, a velocidade foi reduzida para -0,1 m/s em y, na entrada superior do volume de controle, Figura 24.

Figura 24 - Representação do Escoamento do Fluxo de Ar Retirado do ParaView da Simulação 13 no instante T=60s



Fonte: Autor

Por fim, para a terceira simulação não foi possível traçar os perfis de velocidade e EDT devido ao tempo necessário de simulação. Isso ocorreu devido ao grande custo computacional necessário para finalizar a simulação. Dessa forma a simulação não chegou ao tempo de equilíbrio para conseguir resultados satisfatórios para serem apresentados no presente trabalho.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que a utilização do software OpenFOAM se mostrou satisfatória para resolver problemas de mecânica dos fluidos computacionais ligados a área de ventilação e ar-condicionado. Além disso, é possível notar também sua eficácia, pois ele é aplicável a diferentes modelos, malhas e condições de contorno, podendo abranger uma ampla gama de soluções para sistemas HVAC.

Conclui-se é mostrada na Fig. 22, na qual a maior velocidade é representada pela coloração rosa e menor velocidade pela coloração branca. Observa-se que a menor velocidade ocorre no centro do domínio, portanto o ambiente simulado pode ser considerado confortável termicamente, que para o primeiro conjunto de simulações, onde foi considerado apenas a ventilação, as soluções propostas atendem a velocidade máxima especificada pela ANVISA (2009). Desse conjunto, a solução mais eficiente é utilizar duas entradas de ar, pois com elas a velocidade resultante diminui, reduzindo a turbulência no ambiente. Essa diminuição da

turbulência conseqüentemente diminui as zonas de recirculação, reduzindo o risco de contaminação cruzada no ambiente.

No segundo conjunto de simulação, pode-se observar, a partir do Figura 2, que o refinamento da malha foi satisfatório, uma vez que as simulações mais refinadas apresentaram gráficos praticamente constantes após o escoamento entrar em regime. Com base nos dados obtidos, foi possível comparar os perfis de velocidade e temperatura com os valores de referência indicados por Youssef et al (2018). Essa comparação revelou uma convergência entre os resultados de referência e os obtidos pelo presente trabalho. Dessa forma, é possível afirmar que houve convergência do modelo apresentado, o que assegura resultados favoráveis.

Com isso, a partir dos dados obtidos a partir das Tabelas 10 e 11 é possível concluir que não foi possível atender aos 80% mínimo do ADPI para garantir o conforto térmico do ambiente. Dessa forma, para se atingir o ADPI seria necessário alterar os parâmetros de insuflamento de ar, reduzindo a velocidade e aumentando a temperatura do ar de entrada.

## **6. TRABALHOS FUTUROS**

Com isso, as possibilidades de continuação do trabalho são inúmeras. A primeira possibilidade é aguardar a finalização do terceiro conjunto de simulações e fazer a análise quanto ao atendimento do ADPI. Outra possível continuação é alterar os parâmetros da entrada do ar para o segundo conjunto de simulações afim de atingir o conforto térmico. A partir disso, pode ser traçada uma relação entre a velocidade e temperatura de insuflamento com a temperatura inicial da sala afim de determinar qual a melhor combinação para melhorar a eficiência do sistema.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAO, Guangyu *et al.* A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 73, p. 171–186, 2014.
- [2] CAO, Yong *et al.* Large-eddy simulation of separated turbulent flows over a three-dimensional hill using WRF and OpenFOAM. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 236, p. 105357, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167610523000600?via%3Dihub>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- [3] Çengel, Yunus A, and John M Cimbala. *Mecânica Dos Fluidos - 3.Ed.* AMGH Editora, 1 Feb. 2015.
- [4] LIMANE, Abdelhakim; FELLOUAH, Hachimi; GALANIS, Nicolas. Three-dimensional OpenFOAM simulation to evaluate the thermal comfort of occupants, indoor air quality and heat losses inside an indoor swimming pool. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 167, p. 49–68, 2018. Disponível em: Acesso em: 17 out. 2019.
- [5] NEVES, Sidney. **A História do Ar-Condicionado**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://cemeq.ufg.br/n/103153-a-historia-do-ar-condicionado>.
- [6] NOORIMOTLAGH, Zahra *et al.* A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor air environment. **Environmental Research**, [s. l.], v. 193, p. 110612, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7726526/>. Acesso em: 18 abr. 2021.
- [7] A. YOUSSEF, Ahmed *et al.* Studying comfort in a room with cold air system using computational fluid dynamics. *Ain Shams Engineering Journal*, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 1753–1762, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447916301071>.
- [8] WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. [S. l.]: 6° Ed., 2011-.
- [9] TABOR, Gavin; JASAK, Hrvoje ; FUREBY, Christer. **A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics Using Object Orientated Techniques**. [S. l.], 1998. Disponível em:

- [https://www.researchgate.net/publication/260693528\\_A\\_Tensorial\\_Approach\\_to\\_Computational\\_Continuum\\_Mechanics\\_Using\\_Object\\_Orientated\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/260693528_A_Tensorial_Approach_to_Computational_Continuum_Mechanics_Using_Object_Orientated_Techniques). Acesso em: 2023.
- [10] OPENFOAM. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.openfoam.com>. Acesso em: jun. 2023.
- [11] TEXTO NÃO SUBSTITUI, Este; DIÁRIO, Em; DA, Oficial. Ministério da Saúde - MS Agência Nacional de Vigilância Sanitária -ANVISA. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: [http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE\\_09\\_2003\\_.pdf/8cca9c91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10](http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf/8cca9c91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10).
- [12] TEODORO. **Cuidados para Evitar a Transmissão Aérea da COVID-19 no Trabalho**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://onsafety.com.br/cuidados-para-evitar-a-transmissao-aerea-da-covid-19-no-trabalho/>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [13] LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782574900292>.
- [14] GONÇALVES CRISPIM, CLÁUDIA MARIA. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO EM CONSULTÓRIOS ODONTOLÓGICOS PARA PREVENÇÃO DA COVID-19. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**, [s. l.], 2020.
- [15] AMERICAN. **ASHRAE handbook. Fundamentals (SI ed.)**. Atlanta, Ga: American Society Of Heating, Refrigerating And Air Conditioning Engineers, 2009-.

## APÊNDICE A – Ventilação tridimensional sem Transferência de Calor e sem modelo de turbulência

Neste primeiro apêndice é possível encontrar o programa utilizado para realizar as simulações do primeiro conjunto, considerando o volume 3D, sem considerar a transferência de calor

### a) Pasta “0”

#### a. p

```
dimensions [0 2 -2 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type fixedValue;
        value uniform 0.0;
    }
    fixedWalls
    {
        type zeroGradient;
    }
}
```

#### b. U

```
dimensions [0 1 -1 0 0 0];
```

```

internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  inlet
  {
    type      fixedValue;
    value     uniform (0 -0.5 0);
  }
  outlet
  {
    type      zeroGradient;
  }
  fixedWalls
  {
    type      noSlip;
  }
}

```

b) Pasta “constant”

a. transportProperties

```

nu      [0 2 -1 0 0 0 0] 0.00001791;

```

c) Pasta “system”

a. blockMesh

```

scale 1;

```

```

vertices

```

```

(
  (0 0 0)
  (0.5 0 0)
  (1 0 0)
  (1.5 0 0)
  (2 0 0)

```

(2.5 0 0)  
(3 0 0)  
(3.5 0 0) //7  
(0 0.5 0)  
(0.5 0.5 0)  
(1 0.5 0)  
(1.5 0.5 0)  
(2 0.5 0)  
(2.5 0.5 0)  
(3 0.5 0)  
(3.5 0.5 0) //15  
(0 0 0.5)  
(0.5 0 0.5)  
(1 0 0.5)  
(1.5 0 0.5)  
(2 0 0.5)  
(2.5 0 0.5)  
(3 0 0.5)  
(3.5 0 0.5) //23  
(0 0.5 0.5)  
(0.5 0.5 0.5)  
(1 0.5 0.5)  
(1.5 0.5 0.5)  
(2 0.5 0.5)  
(2.5 0.5 0.5)  
(3 0.5 0.5)  
(3.5 0.5 0.5) //31  
(0 1 0)  
(0.5 1 0)  
(1 1 0)  
(1.5 1 0)  
(2 1 0)  
(2.5 1 0)  
(3 1 0)

(3.5 1 0) //39  
(0 1 0.5)  
(0.5 1 0.5)  
(1 1 0.5)  
(1.5 1 0.5)  
(2 1 0.5)  
(2.5 1 0.5)  
(3 1 0.5)  
(3.5 1 0.5) //47  
(0 1.5 0)  
(0.5 1.5 0)  
(1 1.5 0)  
(1.5 1.5 0)  
(2 1.5 0)  
(2.5 1.5 0)  
(3 1.5 0)  
(3.5 1.5 0) //55  
(0 1.5 0.5)  
(0.5 1.5 0.5)  
(1 1.5 0.5)  
(1.5 1.5 0.5)  
(2 1.5 0.5)  
(2.5 1.5 0.5)  
(3 1.5 0.5)  
(3.5 1.5 0.5) //63  
(0 2 0)  
(0.5 2 0)  
(1 2 0)  
(1.5 2 0)  
(2 2 0)  
(2.5 2 0)  
(3 2 0)  
(3.5 2 0) //71  
(0 2 0.5)

(0.5 2 0.5)  
(1 2 0.5)  
(1.5 2 0.5)  
(2 2 0.5)  
(2.5 2 0.5)  
(3 2 0.5)  
(3.5 2 0.5) //79  
(0 2.5 0)  
(0.5 2.5 0)  
(1 2.5 0)  
(1.5 2.5 0)  
(2 2.5 0)  
(2.5 2.5 0)  
(3 2.5 0)  
(3.5 2.5 0) //87  
(0 2.5 0.5)  
(0.5 2.5 0.5)  
(1 2.5 0.5)  
(1.5 2.5 0.5)  
(2 2.5 0.5)  
(2.5 2.5 0.5)  
(3 2.5 0.5)  
(3.5 2.5 0.5) //95  
(0 0 1)  
(0.5 0 1)  
(1 0 1)  
(1.5 0 1)  
(2 0 1)  
(2.5 0 1)  
(3 0 1)  
(3.5 0 1) //103  
(0 0.5 1)  
(0.5 0.5 1)  
(1 0.5 1)

(1.5 0.5 1)  
(2 0.5 1)  
(2.5 0.5 1)  
(3 0.5 1)  
(3.5 0.5 1) //111  
(0 1 1)  
(0.5 1 1)  
(1 1 1)  
(1.5 1 1)  
(2 1 1)  
(2.5 1 1)  
(3 1 1)  
(3.5 1 1) //119  
(0 1.5 1)  
(0.5 1.5 1)  
(1 1.5 1)  
(1.5 1.5 1)  
(2 1.5 1)  
(2.5 1.5 1)  
(3 1.5 1)  
(3.5 1.5 1) //127  
(0 2 1)  
(0.5 2 1)  
(1 2 1)  
(1.5 2 1)  
(2 2 1)  
(2.5 2 1)  
(3 2 1)  
(3.5 2 1) //135  
(0 2.5 1)  
(0.5 2.5 1)  
(1 2.5 1)  
(1.5 2.5 1)  
(2 2.5 1)

(2.5 2.5 1)  
(3 2.5 1)  
(3.5 2.5 1) //143  
(0 0 1.5)  
(0.5 0 1.5)  
(1 0 1.5)  
(1.5 0 1.5)  
(2 0 1.5)  
(2.5 0 1.5)  
(3 0 1.5)  
(3.5 0 1.5) //151  
(0 0.5 1.5)  
(0.5 0.5 1.5)  
(1 0.5 1.5)  
(1.5 0.5 1.5)  
(2 0.5 1.5)  
(2.5 0.5 1.5)  
(3 0.5 1.5)  
(3.5 0.5 1.5) //159  
(0 1 1.5)  
(0.5 1 1.5)  
(1 1 1.5)  
(1.5 1 1.5)  
(2 1 1.5)  
(2.5 1 1.5)  
(3 1 1.5)  
(3.5 1 1.5) //167  
(0 1.5 1.5)  
(0.5 1.5 1.5)  
(1 1.5 1.5)  
(1.5 1.5 1.5)  
(2 1.5 1.5)  
(2.5 1.5 1.5)  
(3 1.5 1.5)

(3.5 1.5 1.5) //175

(0 2 1.5)

(0.5 2 1.5)

(1 2 1.5)

(1.5 2 1.5)

(2 2 1.5)

(2.5 2 1.5)

(3 2 1.5)

(3.5 2 1.5) //183

(0 2.5 1.5)

(0.5 2.5 1.5)

(1 2.5 1.5)

(1.5 2.5 1.5)

(2 2.5 1.5)

(2.5 2.5 1.5)

(3 2.5 1.5)

(3.5 2.5 1.5) //191

(0 0 2)

(0.5 0 2)

(1 0 2)

(1.5 0 2)

(2 0 2)

(2.5 0 2)

(3 0 2)

(3.5 0 2) //199

(0 0.5 2)

(0.5 0.5 2)

(1 0.5 2)

(1.5 0.5 2)

(2 0.5 2)

(2.5 0.5 2)

(3 0.5 2)

(3.5 0.5 2) //207

(0 1 2)

(0.5 1 2)  
(1 1 2)  
(1.5 1 2)  
(2 1 2)  
(2.5 1 2)  
(3 1 2)  
(3.5 1 2) //215  
(0 1.5 2)  
(0.5 1.5 2)  
(1 1.5 2)  
(1.5 1.5 2)  
(2 1.5 2)  
(2.5 1.5 2)  
(3 1.5 2)  
(3.5 1.5 2) //223  
(0 2 2)  
(0.5 2 2)  
(1 2 2)  
(1.5 2 2)  
(2 2 2)  
(2.5 2 2)  
(3 2 2)  
(3.5 2 2) //231  
(0 2.5 2)  
(0.5 2.5 2)  
(1 2.5 2)  
(1.5 2.5 2)  
(2 2.5 2)  
(2.5 2.5 2)  
(3 2.5 2)  
(3.5 2.5 2) //239  
(0 0 2.5)  
(0.5 0 2.5)  
(1 0 2.5)

(1.5 0 2.5)  
(2 0 2.5)  
(2.5 0 2.5)  
(3 0 2.5)  
(3.5 0 2.5) //247  
(0 0.5 2.5)  
(0.5 0.5 2.5)  
(1 0.5 2.5)  
(1.5 0.5 2.5)  
(2 0.5 2.5)  
(2.5 0.5 2.5)  
(3 0.5 2.5)  
(3.5 0.5 2.5) //255  
(0 1 2.5)  
(0.5 1 2.5)  
(1 1 2.5)  
(1.5 1 2.5)  
(2 1 2.5)  
(2.5 1 2.5)  
(3 1 2.5)  
(3.5 1 2.5) //263  
(0 1.5 2.5)  
(0.5 1.5 2.5)  
(1 1.5 2.5)  
(1.5 1.5 2.5)  
(2 1.5 2.5)  
(2.5 1.5 2.5)  
(3 1.5 2.5)  
(3.5 1.5 2.5) //281  
(0 2 2.5)  
(0.5 2 2.5)  
(1 2 2.5)  
(1.5 2 2.5)  
(2 2 2.5)

(2.5 2 2.5)  
(3 2 2.5)  
(3.5 2 2.5) //289  
(0 2.5 2.5)  
(0.5 2.5 2.5)  
(1 2.5 2.5)  
(1.5 2.5 2.5)  
(2 2.5 2.5)  
(2.5 2.5 2.5)  
(3 2.5 2.5)  
(3.5 2.5 2.5) //297

);

blocks

(

hex (0 1 9 8 16 17 25 24) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (1 2 10 9 17 18 26 25) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (2 3 11 10 18 19 27 26) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (3 4 12 11 19 20 28 27) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (4 5 13 12 20 21 29 28) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (5 6 14 13 21 22 30 29) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (6 7 15 14 22 23 31 30) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (8 9 33 32 24 25 41 40) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (9 10 34 33 25 26 42 41) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (10 11 35 34 26 27 43 42) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (11 12 36 35 27 28 44 43) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (12 13 37 36 28 29 45 44) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (13 14 38 37 29 30 46 45) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (14 15 39 38 30 31 47 46) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (32 33 49 48 40 41 57 56) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (33 34 50 49 41 42 58 57) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (34 35 51 50 42 43 59 58) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (35 36 52 51 43 44 60 59) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (36 37 53 52 44 45 61 60) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (37 38 54 53 45 46 62 61) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)

hex (38 39 55 54 46 47 63 62) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (48 49 65 64 56 57 73 72) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (49 50 66 65 57 58 74 73) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (50 51 67 66 58 59 75 74) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (51 52 68 67 59 60 76 75) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (52 53 69 68 60 61 77 76) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (53 54 70 69 61 62 78 77) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (54 55 71 70 62 63 79 78) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (64 65 81 80 72 73 89 88) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (65 66 82 81 73 74 90 89) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (66 67 83 82 74 75 91 90) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (67 68 84 83 75 76 92 91) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (68 69 85 84 76 77 93 92) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (69 70 86 85 77 78 94 93) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (70 71 87 86 78 79 95 94) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (16 17 25 24 96 97 105 104) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (17 18 26 25 97 98 106 105) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (18 19 27 26 98 99 107 106) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (19 20 28 27 99 100 108 107) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (20 21 29 28 100 101 109 108) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (21 22 30 29 101 102 110 109) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (22 23 31 30 102 103 111 110) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (24 25 41 40 104 105 113 112) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (25 26 42 41 105 106 114 113) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (26 27 43 42 106 107 115 114) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (27 28 44 43 107 108 116 115) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (28 29 45 44 108 109 117 116) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (29 30 46 45 109 110 118 117) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (30 31 47 46 110 111 119 118) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (40 41 57 56 112 113 121 120) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (41 42 58 57 113 114 122 121) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (42 43 59 58 114 115 123 122) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (43 44 60 59 115 116 124 123) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (44 45 61 60 116 117 125 124) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)

hex (45 46 62 61 117 118 126 125) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (46 47 63 62 118 119 127 126) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (56 57 73 72 120 121 129 128) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (57 58 74 73 121 122 130 129) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (58 59 75 74 122 123 131 130) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (59 60 76 75 123 124 132 131) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (60 61 77 76 124 125 133 132) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (61 62 78 77 125 126 134 133) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (62 63 79 78 126 127 135 134) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (72 73 89 88 128 129 137 136) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (73 74 90 89 129 130 138 137) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (74 75 91 90 130 131 139 138) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (75 76 92 91 131 132 140 139) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (76 77 93 92 132 133 141 140) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (77 78 94 93 133 134 142 141) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (78 79 95 94 134 135 143 142) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (96 97 105 104 144 145 153 152) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (97 98 106 105 145 146 154 153) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (98 99 107 106 146 147 155 154) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (99 100 108 107 147 148 156 155) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (100 101 109 108 148 149 157 156) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (101 102 110 109 149 150 158 157) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (102 103 111 110 150 151 159 158) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (104 105 113 112 152 153 161 160) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (105 106 114 113 153 154 162 161) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (106 107 115 114 154 155 163 162) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (107 108 116 115 155 156 164 163) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (108 109 117 116 156 157 165 164) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (109 110 118 117 157 158 166 165) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (110 111 119 118 158 159 167 166) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (112 113 121 120 160 161 169 168) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (113 114 122 121 161 162 170 169) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (114 115 123 122 162 163 171 170) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (115 116 124 123 163 164 172 171) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)

hex (116 117 125 124 164 165 173 172) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (117 118 126 125 165 166 174 173) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (118 119 127 126 166 167 175 174) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (120 121 129 128 168 169 177 176) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (121 122 130 129 169 170 178 177) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (122 123 131 130 170 171 179 178) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (123 124 132 131 171 172 180 179) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (124 125 133 132 172 173 181 180) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (125 126 134 133 173 174 182 181) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (126 127 135 134 174 175 183 182) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (128 129 137 136 176 177 185 184) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (129 130 138 137 177 178 186 185) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (130 131 139 138 178 179 187 186) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (131 132 140 139 179 180 188 187) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (132 133 141 140 180 181 189 188) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (133 134 142 141 181 182 190 189) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (134 135 143 142 182 183 191 190) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (144 145 153 152 192 193 201 200) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (145 146 154 153 193 194 202 201) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (146 147 155 154 194 195 203 202) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (147 148 156 155 195 196 204 203) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (148 149 157 156 196 197 205 204) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (149 150 158 157 197 198 206 205) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (150 151 159 158 198 199 207 206) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (152 153 161 160 200 201 209 208) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (153 154 162 161 201 202 210 209) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (154 155 163 162 202 203 211 210) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (155 156 164 163 203 204 212 211) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (156 157 165 164 204 205 213 212) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (157 158 166 165 205 206 214 213) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (158 159 167 166 206 207 215 214) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (160 161 169 168 208 209 217 216) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (161 162 170 169 209 210 218 217) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (162 163 171 170 210 211 219 218) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)

hex (163 164 172 171 211 212 220 219) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (164 165 173 172 212 213 221 220) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (165 166 174 173 213 214 222 221) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (166 167 175 174 214 215 223 222) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (168 169 177 176 216 217 225 224) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (169 170 178 177 217 218 226 225) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (170 171 179 178 218 219 227 226) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (171 172 180 179 219 220 228 227) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (172 173 181 180 220 221 229 228) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (173 174 182 181 221 222 230 229) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (174 175 183 182 222 223 231 230) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (176 177 185 184 224 225 233 232) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (177 178 186 185 225 226 234 233) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (178 179 187 186 226 227 235 234) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (179 180 188 187 227 228 236 235) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (180 181 189 188 228 229 237 236) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (181 182 190 189 229 230 238 237) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (182 183 191 190 230 231 239 238) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (192 193 201 200 240 241 249 248) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (193 194 202 201 241 242 250 249) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (194 195 203 202 242 243 251 250) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (195 196 204 203 243 244 252 251) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (196 197 205 204 244 245 253 252) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (197 198 206 205 245 246 254 253) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (198 199 207 206 246 247 255 254) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (200 201 209 208 248 249 257 256) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (201 202 210 209 249 250 258 257) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (202 203 211 210 250 251 259 258) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (203 204 212 211 251 252 260 259) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (204 205 213 212 252 253 261 260) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (205 206 214 213 253 254 262 261) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (206 207 215 214 254 255 263 262) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (208 209 217 216 256 257 265 264) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)  
hex (209 210 218 217 257 258 266 265) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)

```

hex (210 211 219 218 258 259 267 266) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (211 212 220 219 259 260 268 267) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (212 213 221 220 260 261 269 268) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (213 214 222 221 261 262 270 269) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (214 215 223 222 262 263 271 270) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (216 217 225 224 264 265 273 272) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (217 218 226 225 265 266 274 273) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (218 219 227 226 266 267 275 274) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (219 220 228 227 267 268 276 275) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (220 221 229 228 268 269 277 276) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (221 222 230 229 269 270 278 277) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (222 223 231 230 270 271 279 278) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (224 225 233 232 272 273 281 280) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (225 226 234 233 273 274 282 281) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (226 227 235 234 274 275 283 282) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (227 228 236 235 275 276 284 283) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (228 229 237 236 276 277 285 284) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (229 230 238 237 277 278 286 285) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
hex (230 231 239 238 278 279 287 286) (30 30 30) simpleGrading (1 1 1)
);
edges
(
);
boundary
(
  inlet
  {
    type wall;
    faces
    (
      (139 187 188 140)
    );
  }
  outlet

```

```

{
  type wall;
  faces
  (
    (7 15 31 23)
  );
}
fixedWalls
{
  type wall;
  faces
  (
    // Posterior
    (0 8 9 1)
    (1 9 10 2)
    (2 10 11 3)
    (3 11 12 4)
    (4 12 13 5)
    (5 13 14 6)
    (6 14 15 7)
    (8 32 33 9)
    (9 33 34 10)
    (10 34 35 11)
    (11 35 36 12)
    (12 36 37 13)
    (13 37 38 14)
    (14 38 39 15)
    (32 48 49 33)
    (33 49 50 34)
    (34 50 51 35)
    (35 51 52 36)
    (36 52 53 37)
    (37 53 54 38)
    (38 54 55 39)
  )
}

```

(48 64 65 49)

(49 65 66 50)

(50 66 67 51)

(51 67 68 52)

(52 68 69 53)

(53 69 70 54)

(54 70 71 55)

(64 80 81 65)

(65 81 82 66)

(66 82 83 67)

(67 83 84 68)

(68 84 85 69)

(69 85 86 70)

(70 86 87 71)

//Base

(0 1 17 16)

(1 2 18 17)

(2 3 19 18)

(3 4 20 19)

(4 5 21 20)

(5 6 22 21)

(6 7 23 22)

(16 17 97 96)

(17 18 98 97)

(18 19 99 98)

(19 20 100 99)

(20 21 101 100)

(21 22 102 101)

(22 23 103 102)

(96 97 145 144)

(97 98 146 145)

(98 99 147 146)

(99 100 148 147)

(100 101 149 148)

(101 102 150 149)  
(102 103 151 150)  
(144 145 193 192)  
(145 146 194 193)  
(146 147 195 194)  
(147 148 196 195)  
(148 149 197 196)  
(149 150 198 197)  
(150 151 199 198)  
(192 193 241 240)  
(193 194 242 241)  
(194 195 243 242)  
(195 196 244 243)  
(196 197 245 244)  
(197 198 246 245)  
(198 199 247 246)

// Direita

(15 39 47 31)  
(39 55 63 47)  
(55 71 79 63)  
(71 87 95 79)  
(23 31 111 103)  
(31 47 119 111)  
(47 63 127 119)  
(63 79 135 127)  
(79 95 143 135)  
(103 111 159 151)  
(111 119 167 159)  
(119 127 175 167)  
(127 135 183 175)  
(135 143 191 183)  
(151 159 207 199)  
(159 167 215 207)  
(167 175 223 215)

(175 183 231 223)

(183 191 239 231)

(247 255 207 199)

(255 263 215 207)

(263 271 223 215)

(271 279 231 223)

(279 287 239 231)

//Esquerda

(0 16 24 8)

(8 24 40 32)

(32 40 56 48)

(48 56 72 64)

(64 72 88 80)

(16 96 104 24)

(24 104 112 40)

(40 112 120 56)

(56 120 128 72)

(72 128 136 88)

(96 144 152 104)

(104 152 160 112)

(112 160 168 120)

(120 168 176 128)

(128 176 184 136)

(144 192 200 152)

(152 200 208 160)

(160 208 216 168)

(168 216 224 176)

(176 224 184 232)

(192 240 248 200)

(200 248 256 208)

(208 256 264 216)

(216 264 224 272)

(224 272 280 232)

//Cima

(80 88 89 81)  
(81 89 90 82)  
(82 90 91 83)  
(83 91 92 84)  
(84 92 93 85)  
(85 93 94 86)  
(86 94 95 87)  
(88 136 137 89)  
(89 137 138 90)  
(90 138 139 91)  
(91 139 140 92)  
(92 140 141 93)  
(93 141 142 94)  
(94 142 143 95)  
(136 184 185 137)  
(137 185 186 138)  
(138 186 187 139)  
(140 188 189 141)  
(141 189 190 142)  
(142 190 191 143)  
(184 232 233 185)  
(185 233 234 186)  
(186 234 235 187)  
(187 235 236 188)  
(188 236 237 189)  
(189 237 238 190)  
(190 238 239 191)  
(232 280 281 233)  
(233 281 282 234)  
(234 282 283 235)  
(235 283 284 236)  
(236 284 285 237)  
(237 285 286 238)  
(238 286 287 239)

//Frente

(240 241 249 248)

(241 242 250 249)

(242 243 251 250)

(243 244 252 251)

(244 245 253 252)

(245 246 254 253)

(246 247 255 254)

(248 249 257 256)

(249 250 258 257)

(250 251 259 258)

(251 252 260 259)

(252 253 261 260)

(253 254 262 261)

(254 255 263 262)

(256 257 265 264)

(257 258 266 265)

(258 259 267 266)

(259 260 268 267)

(260 261 269 268)

(261 262 270 269)

(262 263 271 270)

(264 265 272 273)

(265 266 274 273)

(266 267 275 274)

(267 268 276 275)

(268 269 277 276)

(269 270 278 277)

(270 271 279 278)

(272 273 280 281)

(273 274 281 282)

(274 275 282 283)

(275 276 283 284)

(276 277 284 285)

```

        (277 278 285 286)
        (278 279 286 287)
    );
}
);
mergePatchPairs
(
);

```

b. controlDict

```

application    icoFoam;
startFrom     startTime;
startTime     0;
stopAt        endTime;
endTime       200;
deltaT        0.0205;
writeControl  timeStep;
writeInterval 48;
purgeWrite    0;
writeFormat   ascii;
writePrecision 6;
writeCompression off;
timeFormat    general;
timePrecision 6;
runTimeModifiable true;

```

c. fvSchemes

```

ddtSchemes
{
    default    Euler;
}
gradSchemes

```

```

{
  default      Gauss linear;
  grad(p)     Gauss linear;
}
divSchemes
{
  default      none;
  div(phi,U)  Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
  default      Gauss linear orthogonal;
}
interpolationSchemes
{
  default      linear;
}
snGradSchemes
{
  default      orthogonal;
}

```

d. fvSolution

```

solvers
{
  p
  {
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-06;
    relTol     0.05;
  }
  pFinal

```

```
{
    $p;
    relTol    0;
}
U
{
    solver    smoothSolver;
    smoother  symGaussSeidel;
    tolerance 1e-05;
    relTol    0;
}
}
PISO
{
    nCorrectors    2;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    pRefCell    0;
    pRefValue    0;
}
}
```

## APÊNDICE B - 4.2. Ventilação bidimensional com transferência de calor e modelagem de turbulência

No apêndice B tem o programa utilizado nas simulações em dimensão 2D com transferência de calor e modelo turbulento.

### a) Pasta "0"

#### a. Alphas

```
dimensions [1 -1 -1 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    frontAndBack
    {
        type empty;
    }
    top
    {
        type compressible::alphaWallFunction;
        Prt 0.707;
        value uniform 0;
    }
    bottom
    {
        type compressible::alphaWallFunction;
        Prt 0.707;
        value uniform 0;
    }
    left
    {
        type compressible::alphaWallFunction;
        Prt 0.707;
        value uniform 0;
    }
    right
```

```

    {
      type      compressible::alphanWallFunction;
      Prt      0.707;
      value     uniform 0;
    }
  inlet
  {
    type      compressible::alphanWallFunction;
    Prt      0.707;
    value     uniform 0;
  }
  outlet
  {
    type      compressible::alphanWallFunction;
    Prt      0.707;
    value     uniform 0;
  }
}

```

b.  $\epsilon$

```

dimensions [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField uniform 0.01;
boundaryField
{
  frontAndBack
  {
    type      empty;
  }
  top
  {
    type      epsilonWallFunction;
    value     uniform 4e-06;
  }
}

```

```

bottom
{
  type    epsilonWallFunction;
  value   uniform 4e-06;
}
left
{
  type    epsilonWallFunction;
  value   uniform 4e-06;
}
right
{
  type    epsilonWallFunction;
  value   uniform 4e-06;
}
inlet
{
  type    epsilonWallFunction;
  value   uniform 4e-06;
}
outlet
{
  type    epsilonWallFunction;
  value   uniform 4e-06;
}
}

```

c. k

```

dimensions [0 2 -2 0 0 0];
internalField uniform 0.1;
boundaryField
{
  frontAndBack

```

```

    {
      type      empty;
    }
  top
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0;
  }
  bottom
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0;
  }
  left
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0;
  }
  right
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0;
  }
  inlet
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0;
  }
  outlet
  {
    type      kqRWallFunction;
    value     uniform 0;
  }
}

```

d. nut

```
dimensions [0 2 -1 0 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    frontAndBack
    {
        type empty;
    }
    top
    {
        type nutUWallFunction;
        value uniform 0;
    }
    bottom
    {
        type nutUWallFunction;
        value uniform 0;
    }
    left
    {
        type nutUWallFunction;
        value uniform 0;
    }
    right
    {
        type nutUWallFunction;
        value uniform 0;
    }
    inlet
    {
        type nutUWallFunction;
```

```

        value    uniform 0;
    }
    outlet
    {
        type      nutUWallFunction;
        value     uniform 0;
    }
}

```

e. p

```

dimensions [1 -1 -2 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
    frontAndBack
    {
        type      empty;
    }
    top
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    bottom
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
    left
    {
        type      calculated;
        value     $internalField;
    }
}

```

```

right
{
  type    calculated;
  value   $internalField;
}
inlet
{
  type    calculated;
  value   $internalField;
}
outlet
{
  type    calculated;
  value   $internalField;
}
}

```

f. p\_rgh

```

dimensions [1 -1 -2 0 0 0];
internalField uniform 0;
boundaryField
{
  frontAndBack
  {
    type    empty;
  }
  top
  {
    //type    zeroGradient;
    type    fixedFluxPressure;
    value   $internalField;
  }
  bottom

```

```

{
    //type    zeroGradient;
    type     fixedFluxPressure;
    value    $internalField;
}
left
{
    //type    zeroGradient;
    type     fixedFluxPressure;
    value    $internalField;
}
right
{
    //type    zeroGradient;
    type     fixedFluxPressure;
    value    $internalField;
}
inlet
{
    //type    zeroGradient;
    type     fixedFluxPressure;
    value    $internalField;
}
outlet
{
    type     fixedValue;
    value    uniform 0.0;
    //type    fixedFluxPressure;
    //value    $internalField;
}
}

```

g. T.orig

```
dimensions [0 0 0 1 0 0 0];
internalField uniform 300.15;
boundaryField
{
    frontAndBack
    {
        type empty;
    }
    top
    {
        type fixedGradient;
        gradient uniform 950.5703422;
    }
    bottom
    {
        type fixedGradient;
        gradient uniform 2281.368821;
    }
    left
    {
        type fixedGradient;
        gradient uniform 950.5703422;
    }
    right
    {
        type fixedGradient;
        gradient uniform 950.5703422;
    }
    inlet
    {
        type fixedValue;
        value uniform 287.15;
    }
    outlet
```

```
    {
      type      zeroGradient;
    }
  }
}
```

h. U

```
dimensions  [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  frontAndBack
  {
    type      empty;
  }
  top
  {
    type      noSlip;
  }
  bottom
  {
    type      noSlip;
  }
  left
  {
    type      noSlip;
  }
  right
  {
    type      noSlip;
  }
  inlet
  {
```

```

        type    fixedValue;
        value    uniform (0.8 0 0);
    }
    outlet
    {
        type    zeroGradient;
    }
}

```

b) Pasta “constant”

a. g

```

dimensions [0 1 -2 0 0 0];
value      (0 -9.81 0);

```

b. momentumTransport

```

simulationType RAS;
RAS
{
    model    RNGkEpsilon;
    turbulence on;
    printCoeffs on;

// Optional model coefficients
    cmu    0.0845;
    C1     1.42;
    C2     1.68;
    C3     0.0; //-0.33;
    beta   0.012;
    eta0   4.38;
    sigmaEps 0.71942;
    sigamk 0.71942;
    alphak 1.393;

```

```
alphaEps 1.393;
```

```
}
```

c. thermophysicalProperties

```
thermoType
```

```
{
```

```
type heRhoThermo;
```

```
mixture pureMixture;
```

```
transport const;
```

```
thermo eConst;
```

```
equationOfState Boussinesq;
```

```
specie specie;
```

```
energy sensibleInternalEnergy;
```

```
}
```

```
mixture
```

```
{
```

```
specie
```

```
{
```

```
molWeight 28.97;
```

```
}
```

```
equationOfState
```

```
{
```

```
rho0 1.178;
```

```
T0 300.15;
```

```
beta 3.368e-03;
```

```
}
```

```
thermodynamics
```

```
{
```

```
Cv 719.23;
```

```
Hf 0;
```

```
}
```

```
transport
```

```

    {
      mu      1.828e-05;
      Pr      0.71;
      DT [0 2 -1 0 0 0 0] 17.748e-6; //2.41e-5;
    }
  }
}

```

c) Pasta “System”

a. blockMeshDict

```

convertToMeters 1;

vertices
(
  (0 0 0) //00
  (0.61 0 0) //01
  (1.22 0 0) //02
  (1.83 0 0) //03
  (2.44 0 0) //04
  (0 0.08 0) //05
  (0.61 0.08 0) //06
  (1.22 0.08 0) //07
  (1.83 0.08 0) //08
  (2.44 0.08 0) //09
  (0 1.165 0) //10
  (0.61 1.165 0) //11
  (1.22 1.165 0) //12
  (1.83 1.165 0) //13
  (2.44 1.165 0) //14
  (0 2.41 0) //15
  (0.61 2.41 0) //16
  (1.22 2.41 0) //17
  (1.83 2.41 0) //18
  (2.44 2.41 0) //19
)

```

(0 2.44 0) //20  
(0.61 2.44 0) //21  
(1.22 2.44 0) //22  
(1.83 2.44 0) //23  
(2.44 2.44 0) //24  
(0 0 1) //25  
(0.61 0 1) //26  
(1.22 0 1) //27  
(1.83 0 1) //28  
(2.44 0 1) //29  
(0 0.08 1) //30  
(0.61 0.08 1) //31  
(1.22 0.08 1) //32  
(1.83 0.08 1) //33  
(2.44 0.08 1) //34  
(0 1.165 1) //35  
(0.61 1.165 1) //36  
(1.22 1.165 1) //37  
(1.83 1.165 1) //38  
(2.44 1.165 1) //39  
(0 2.41 1) //40  
(0.61 2.41 1) //41  
(1.22 2.41 1) //42  
(1.83 2.41 1) //43  
(2.44 2.41 1) //44  
(0 2.44 1) //45  
(0.61 2.44 1) //46  
(1.22 2.44 1) //47  
(1.83 2.44 1) //48  
(2.44 2.44 1) //49

);

blocks

(

```

hex (0 1 6 5 25 26 31 30) (44 44 1) simpleGrading (30 1 1) //I
hex (1 2 7 6 26 27 32 31) (10 44 1) simpleGrading (1 1 1) // II
hex (2 3 8 7 27 28 33 32) (10 44 1) simpleGrading (1 1 1) //III
hex (3 4 9 8 28 29 34 33) (44 44 1) simpleGrading (0.033 1 1) //IV
hex (5 6 11 10 30 31 36 35) (44 44 1) simpleGrading (30 80 1) //V
hex (6 7 12 11 31 32 37 36) (10 44 1) simpleGrading (1 80 1) //VI
hex (7 8 13 12 32 33 38 37) (10 44 1) simpleGrading (1 80 1) //VII
hex (8 9 14 13 33 34 39 38) (44 44 1) simpleGrading (0.033 80 1) //VIII
hex (10 11 16 15 35 36 41 40) (44 44 1) simpleGrading (30 0.0035 1) //IX
hex (11 12 17 16 36 37 42 41) (10 44 1) simpleGrading (1 0.0035 1) //X
hex (12 13 18 17 37 38 43 42) (10 44 1) simpleGrading (1 0.0035 1) //XI
hex (13 14 19 18 38 39 44 43) (44 44 1) simpleGrading (0.033 0.0035 1)
//XII
hex (15 16 21 20 40 41 46 45) (44 44 1) simpleGrading (30 1 1) // XIII
hex (16 17 22 21 41 42 47 46) (10 44 1) simpleGrading (1 1 1) // XIV
hex (17 18 23 22 42 43 48 47) (10 44 1) simpleGrading (1 1 1) // XV
hex (18 19 24 23 43 44 49 48) (44 44 1) simpleGrading (0.033 1 1) //XVI
);
edges
(
);
boundary
(
top
{
type wall;
faces
(
(20 45 46 21)
(21 46 47 22)
(22 47 48 23)
(23 48 49 24)
);
}
);
}

```

```
bottom
{
  type wall;
  faces
  (
    (0 1 26 25)
    (1 2 27 26)
    (2 3 28 27)
    (3 4 29 28)
  );
}
frontAndBack
{
  type empty;
  faces
  (
    (0 5 6 1)
    (1 6 7 2)
    (2 7 8 3)
    (3 8 9 4)
    (5 10 11 6)
    (6 11 12 7)
    (7 12 13 8)
    (8 13 14 9)
    (10 15 16 11)
    (11 16 17 12)
    (12 17 18 13)
    (13 18 19 14)
    (15 20 21 16)
    (16 21 22 17)
    (17 22 23 18)
    (18 23 24 19)
    (25 26 31 30)
    (26 27 32 31)
  )
}
```

```
(27 28 33 32)
(28 29 34 33)
(30 31 36 35)
(31 32 37 36)
(32 33 38 37)
(33 34 39 38)
(35 36 41 40)
(36 37 42 41)
(37 38 43 42)
(38 39 44 43)
(40 41 46 45)
(41 42 47 46)
(42 43 48 47)
(43 44 49 48)
);
}
left
{
  type wall;
  faces
  (
    (0 25 30 5)
    (5 30 35 10)
    (10 35 40 15)
  );
}
right
{
  type wall;
  faces
  (
    (9 14 39 34)
    (14 19 44 39)
    (19 24 49 44)
```

```

    );
}
inlet
{
    type wall;
    faces
    (
        (15 40 45 20)
    );
}
outlet
{
    type wall;
    faces
    (
        (4 9 34 29)
    );
}
);
mergePatchPairs
(
);

```

b. controlDict

```

application    buoyantPimpleFoam;
startFrom     startTime;
startTime     0;
stopAt        endTime;
endTime       2000;
deltaT        0.0002;
writeControl   timeStep;
writeInterval 10000;
purgeWrite    0;

```

```

writeFormat  ascii;
writePrecision 6;
writeCompression off;
timeFormat   general;
timePrecision 6;
runTimeModifiable true;

```

c. fvSchemes

```

ddtSchemes
{
    default    CrankNicolson 0.9;
}
gradSchemes
{
    default    Gauss linear;
}
divSchemes
{
    default    none;
    div(phi,U)  Gauss linear;
    div(phi,e)  Gauss linear;
    div(phi,k)  Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div(phi,p)  Gauss linear;
    div(phi,K)  Gauss linear;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
    default    Gauss linear corrected;
}
interpolationSchemes
{

```

```

        default    linear;
    }
    snGradSchemes
    {
        default    corrected;
    }

```

d. fvSolution

```

solvers
{
    "rho.*"
    {
        solver    diagonal;
    }
    p_rgh
    {
        solver    PCG;
        preconditioner DIC;
        tolerance 1e-6;
        relTol    0.01;
    }
    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        relTol    0;
    }
    "(U|e|k|epsilon)"
    {
        solver    PBiCGStab;
        preconditioner DILU;
        tolerance 1e-6;
        relTol    0.1;
    }
}

```

```
"(U|e|k|epsilon)Final"  
{  
  $U;  
  relTol    0;  
}  
}  
PIMPLE  
{  
  momentumPredictor yes;  
  nOuterCorrectors 1;  
  nCorrectors    2;  
  nNonOrthogonalCorrectors 0;  
  pRefCell      0;  
  pRefValue     0;  
}
```