



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**Coordenação de Engenharia Química/CCET**  
Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

**GABRIEL LORENÇONI FASSARELLA**

# **ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM SECADOR DE BIOMASSA INDUSTRIAL**

São Luis  
2023

**GABRIEL LORENÇONI FASSARELLA**

# **ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM SECADOR DE BIOMASSA INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Colegiado de Curso da Engenharia Química do  
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Uni-  
versidade Federal do Maranhão, como parte dos  
requisitos para obtenção do diploma de Gradua-  
ção em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Elmo de Sena Ferreira  
Júnior

São Luis  
2023

### Ficha Catalográfica

A confecção da ficha catalográfica é realizada exclusivamente pelo Serviço Técnico do Núcleo de Bibliotecas da UFMA e deve ser inserida no lugar desta folha.

Para solicitá-la, dirija-se a Biblioteca Central ou Setorial ou gere-a automaticamente através do SIGAA: Sessão Biblioteca => Serviço ao usuário => Gerar ficha catalogada.

Somente gere a ficha após ter elaborado a versão final do trabalho, em que efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora.

A ficha catalográfica deve ser impressa na parte inferior, no verso da Folha de Rosto.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Elmo de Sena Ferreira Júnior  
Orientador - COEQ/CCET/UFMA

---

Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Velez  
COEQ/CCET/UFMA

---

Eng. Dielson Muniz Silva  
Empresa LAVARE



**DADOS CURRICULARES****Gabriel Lorençoni Fassarella****NASCIMENTO** 24/01/2000 - Itapemirim/ES**FILIAÇÃO** José Maria Fassarella e Regina Célia Lorençoni**2018/2023** Curso de Graduação em Engenharia Química - UFMA

*Dedico esse trabalho aos meus pais e a minha  
tia Teresa.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pela força que me permite levantar e enfrentar os problemas de cada dia.

Agradeço aos meus pais, pois eles trabalharam para que eu pudesse estudar.

Agradeço ao professor Dr. Elmo, meu orientador, que me ensinou, corrigiu e escutou.

Agradeço aos professores do COEQ por sua didática e paciência, pois antes do curso eu não sabia nada. Em especial ao professor Dr. Harvey por ter concedido dados e medidas experimentais que permitiram esse trabalho ser realizado e bem como Thunderhead Engineering por conceder licença acadêmica do software Pyrosim.

Agradeço Maria, que não queria estar nos agradecimento, mas eu a coloquei.

Agradeço aos amigos e colegas de curso, que sempre possamos nos ajudar no futuro como nos ajudamos durante a graduação.

Agradeço aos meus amigos da vida: da Vila Esperança, do Espírito Santo, do 13 de Outubro, da Ilha do Tabuleiro, do IFMA e UFMA.

***“Bendito seja o Senhor, a minha Rocha, que  
treina as minhas mãos para a guerra e os meus  
dedos para a batalha.”***

***Salmo 144:1***

FASSARELLA, Gabriel Lorençoni. **ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM SECADOR DE BIOMASSA INDUSTRIAL**. 2023. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

## RESUMO

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se revelado uma ferramenta eficaz para a análise numérica de equipamentos industriais, possibilitando a simulação de diversos parâmetros e a medição de condições de difícil acesso em equipamentos reais com resultados aproximados. O presente trabalho concentrou-se na simulação de um forno de secagem de biomassa, baseado em um equipamento de uma indústria têxtil em São Luís - MA, Brasil. Por meio de softwares de fluidodinâmica computacional e resolução numérica do tipo LES, foi possível avaliar seu perfil de temperatura em diferentes velocidades e temperatura de alimentação. A validação do método foi realizada por meio da comparação dos resultados numéricos com dados experimentalmente coletados, onde somente as simulações de baixa temperatura e velocidade não corresponderam ao desvio padrão médio dos dados experimentais. Posterior a isso, foram propostos dois outros designs e novas simulações foram conduzidas para avaliar os perfis de temperatura e compará-los com o primeiro. No segundo design, três entradas de alimentação foram removidas, resultando em uma redução de temperatura de 46,39% em uma das linhas de monitoramento em comparação com o primeiro design, mas apenas 1,39% na superfície onde a biomassa é posicionada, indicando que as alimentações removidas pouco influenciavam a temperatura nesta região. A melhor utilização de uma corrente de circulação permitiu o terceiro design apresentar melhor uniformidade de temperatura ao longo do equipamento em 12,35%, mantendo a mesma configuração de alimentação do primeiro design.

**Palavras-chave:** Perfil de temperatura. Fornos de secagem. Fluidodinâmica computacional. Análise numérica.

FASSARELLA, Gabriel Lorençoni. **ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION OF AN INDUSTRIAL BIOMASS DRYER** – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

## ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) has proven to be an effective tool for the numerical analysis of industrial equipment, enabling the simulation of various parameters and the measurement of hard-to-access conditions in real equipment with approximate results. This work focused on simulating a biomass drying furnace based on equipment from a textile industry in São Luís - MA, Brazil. Using computational fluid dynamics software and Large Eddy Simulation (LES) numerical resolution, it was possible to evaluate its temperature profile at different feed speeds and temperatures. The method was validated by comparing numerical results with experimentally collected data, where only simulations at low temperature and speed did not match within the mean standard deviation of the experimental data. Subsequently, two additional designs were proposed, and new simulations were conducted to evaluate temperature profiles and compare them with the first design. In the second design, three feed inlets were removed, resulting in a temperature reduction of 46.39% in one of the monitoring lines compared to the first design, but only 1.39% on the surface where the biomass is positioned, indicating that the removed feeds had little influence on the temperature in this region. The improved utilization of a circulation stream allowed the third design to exhibit better an temperature uniformity throughout the equipment by 12.35%, while maintaining the same feeding configuration as the initial design.

**Keywords:** Temperature profile. Industrial dryers. Computational fluid dynamics. Numerical analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Gráfico da secagem em condições constantes . . . . .	5
Figura 3.2 – Gráfico da taxa de secagem em condições constantes. . . . .	6
Figura 3.3 – Gráfico da temperatura das paredes externas e do teto ao longo do forno. . .	8
Figura 3.4 – Representação de discretização numérica. . . . .	9
Figura 3.5 – Representação das etapas de Pré-Processamento . . . . .	10
Figura 3.6 – Representação das etapas de Pós-Processamento. . . . .	10
Figura 3.7 – Mapa Mental da Análise Numérica da Fluidodinâmica . . . . .	11
Figura 3.8 – Representação de um Volume de Controle Fixo e Finito. . . . .	12
Figura 3.9 – Ilustração de um elemento de fluido movendo-se entre pontos. . . . .	12
Figura 4.1 – Representação do Design de forno 1. . . . .	18
Figura 4.2 – Representação do posicionamento dos orifícios. . . . .	18
Figura 4.3 – Visão lateral do Design 1 construído no Pyrosim. . . . .	19
Figura 4.4 – Representação do Design de forno 2. . . . .	19
Figura 4.5 – Representação da disposição de superfície com orifícios e nova passagem de ar do design 3. . . . .	20
Figura 4.6 – Visão lateral do Design 3 construído no Pyrosim. . . . .	20
Figura 4.7 – Etapas de pré-processamento, solver e pós-processamento utilizadas para o desenvolvimento de um forno de secagem. . . . .	20
Figura 4.8 – Comparativo entre os diferentes tamanhos de malha computacional utilizados. .	21
Figura 4.9 – Configurações de Malhas e seus posicionamentos. . . . .	22
Figura 4.10–Dispositivos de Controle para comparação com dados experimentais. . . . .	24
Figura 4.11–Representação das linhas de controle estacionário. . . . .	24
Figura 5.1 – Temperatura dos pontos de validação do modelo D1T200V7, D1T200V4 e D1T200V2 em comparação com a média experimental. . . . .	26
Figura 5.2 – Temperatura dos pontos de validação do modelo D1T140V7, D1T140V4 e D1T140V2 em comparação com a média experimental. . . . .	26
Figura 5.3 – Temperatura dos pontos de validação do modelo D1T120V7, D1T120V4 e D1T120V2 em comparação com a média experimental. . . . .	27
Figura 5.4 – Posicionamento dos dispositivos de controle dinâmicos selecionados - Visão superior. . . . .	28
Figura 5.5 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T200V7 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8. . . . .	28
Figura 5.6 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T200V4 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8. . . . .	29
Figura 5.7 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T200V2 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8. . . . .	29

Figura 5.8 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T120V7 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8. . . . .	30
Figura 5.9 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D1T200V7. . .	30
Figura 5.10–Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D1T200V4. . .	31
Figura 5.11–Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D1T200V2. . .	31
Figura 5.12–Visão lateral da distribuição de temperatura - D1T200V7. . . . .	32
Figura 5.13–Visão lateral da distribuição de temperatura - D1T200V4. . . . .	32
Figura 5.14–Visão lateral da distribuição de temperatura - D1T200V2. . . . .	33
Figura 5.15–Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D2T200V7. . .	33
Figura 5.16–Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D2T200V4. . .	34
Figura 5.17–Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D2T200V2. . .	34
Figura 5.18–Comparação entre distribuição de temperatura dos modelos D1T200V7 e D2T200V7 ao longo do forno. . . . .	35
Figura 5.19–Visão lateral da distribuição de temperatura - D2T140V7 . . . . .	35
Figura 5.20–Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D3T200V7. . .	36
Figura 5.21–Variação de Temperatura pelo Tempo - D3T200V7 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8. . . . .	36
Figura 5.22–Variação de Temperatura pelo Tempo - D3T200V4 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8. . . . .	37
Figura 5.23–Perfil de Velocidade (m/s) - D1T200V7. . . . .	37
Figura 5.24–Perfil de Velocidade (m/s) - D3T200V7. . . . .	37
Figura B.1 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T200V7 e D1T200V4	52
Figura B.2 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T200V2 e D1T140V7	52
Figura B.3 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T140V4 e D1T140V2	53
Figura B.4 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T120V7 e D1T120V4	53
Figura B.5 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T120V2 e D2T200V7	54
Figura B.6 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T200V4 e D2T200V2	54
Figura B.7 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T140V7 e D2T140V4	55
Figura B.8 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T140V2 e D2T120V7	55
Figura B.9 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T120V4 e D2T120V2	56
Figura B.10–Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V7 e D3T200V4	56
Figura B.11–Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V2 e D3T140V7	57
Figura B.12–Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V2 e D3T140V7	57
Figura B.13–Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V2 e D3T140V7	58
Figura B.14–Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T140V7 e D3T140V2	58
Figura B.15–Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T120V7 e D3T120V4	59
Figura B.16–Perfil de Temperatura Quantitativo e Estacionário - D3T120V2 . . . . .	59



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados da secagem de resíduos de acerola. . . . .	7
Tabela 3.2 – Equações de Navier-Stokes. . . . .	15
Tabela 4.1 – Lista de modelos . . . . .	23
Tabela 4.2 – Parâmetros constantes para todos modelos . . . . .	23

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

COEQ	Coordenação de Engenharia Química
UFMA	Universidade Federal do Maranhão
CFD	Computational Fluid Dynamics (Fluidodinâmica computacional)
NIST	National Institute of Standards and Technology
FDS	Fire Dynamic Simulator
LES	Large Eddy Simulation (Simulação de Grande Vértice)
GUI	Graphical User Interface (Interface Gráfica do Usuário)

## SUMÁRIO

<b>FOLHA DE APROVAÇÃO</b>	<b>ii</b>
<b>DADOS CURRICULARES</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATÓRIO</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>v</b>
<b>EPÍGRAFE</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>xii</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivos Gerais	3
2.2 Objetivos Específicos	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
3.1 Secagem	4
3.2 Perfil de Temperatura	8
3.3 Análise Numérica	9
3.3.1 Fluidodinâmica Computacional	9
3.3.2 Equações Governantes	11
3.3.2.1 Volume dos Controles Finitos	11
3.3.2.2 Derivada Substancial para Equações Governantes	12
3.3.2.3 Síntese das Equações Governantes para Fluidodinâmica - Navier-Stokes	14
3.3.2.4 Método numérico de Large Eddy Simulation (LES)	14
3.3.3 Fire Dynamics Simulator, Smokeview e Pyrosim	16
3.3.3.1 LES-FDS	16
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
4.1 Modelos de Fornos de Secagem	17
4.1.1 Design 1	17
4.1.2 Design 2	17
4.1.3 Design 3	18
4.2 Configurações de Pré-Processamento	19

4.2.1	Construção da Geometria . . . . .	21
4.2.2	Malha Computacional . . . . .	21
4.2.3	Condições de Contorno . . . . .	21
4.2.4	Solver e Pós-Processamento . . . . .	22
4.3	Sistema de Monitoramento . . . . .	22
5	RESULTADOS . . . . .	25
5.1	Validação do Método . . . . .	25
5.2	Perfil de Temperatura . . . . .	25
5.2.1	Perfil de Temperatura nos Modelos com Design 1 . . . . .	27
5.2.2	Perfil de Temperatura nos Modelos com Design 2 . . . . .	30
5.2.3	Perfil de Temperatura nos Modelos com Design 3 . . . . .	32
6	CONCLUSÃO . . . . .	38
6.1	Design 1 . . . . .	38
6.2	Design 2 . . . . .	38
6.3	Design 3 . . . . .	39
6.4	Sugestão para Trabalhos Futuros . . . . .	39
	Referências . . . . .	40
	APÊNDICE A – CODIFICAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS	42
	APÊNDICE B – PERFIS DE TEMPERATURA . . . . .	52
	ANEXO A – PLANILHA COM DADOS EXPERIMENTAIS . . . . .	60

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes energéticas limpas e renováveis constituem uma necessidade emergencial diante das calamidades climáticas e ambientais vivenciadas atualmente (GIELEN et al., 2019). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), a temperatura média do planeta subiu 1,1° C em comparação às temperaturas pré-industriais, consequência de uma contínua queima de combustíveis fósseis e devastação do meio-ambiente.

Em avanço, é urgente assinalar que uma das principais alternativas de combate ao colapso ambiental é a redução da emissão dos gases do efeito estufa (greenhouse gases), o que reflete diretamente na produção energética global. Nesse contexto, destaca-se a biomassa como uma das principais fontes de energia alternativa, podendo ser definida como a transformação de matéria orgânica vegetal (phytomass) ou animal (zoomass) em energia química (SAIDUR et al., 2011). Destaca-se como um dos principais atrativos da energia da biomassa a segurança e a constância inerentes ao seu processo de obtenção.

Pormenorizando seus benefícios, é possível evidenciar a variedade de matéria-prima; independência de fatores edafoclimáticos específicos e a baixa emissão de gás carbônico, em que pese seus processos industriais, pois a taxa de emissão é aproximada à taxa consumida durante a produção agrícola do material (LI, 2022).

A diversidade é um dos principais atrativos nas economias em desenvolvimento, devido ao baixo custo e a dispensabilidade de processamento antes do uso, desde que observada a procedência sustentável da matéria-prima (KAREKEZI; LATA; COELHO, 2004). Assim, conforme os dados da Agência Internacional de Energia, em 2020, 6,7% da produção energética mundial era fruto do uso tradicional da biomassa, destacando-se a combustão de matéria, cocção, secagem e afins.

Todavia, embora a energia química da biomassa possa ser obtida por meio de uma miríade de recursos e procedimentos tecnológicos, existem especificidades a serem atendidas a fim de se obter o maior custo-benefício possível, por exemplo, o nível técnico, a qualidade ambiental, os recursos disponíveis e a demanda industrial da região. Nesse contexto, é necessário que se verifique o rigor metodológico para o desenvolvimento de equipamentos industriais voltados a essas atividades. Atentando-se ao melhor aproveitamento da matéria-prima, bem como a menor quantidade possível de energia a ser consumida no processo.

Assim, a fim de atender ao objetivo supramencionado, a presente pesquisa investigará a possibilidade de utilizar a Fluidodinâmica Computacional para resolução numérica, de modo a determinar melhores condições para otimização de propriedades de um equipamento industrial.

Anand, Mishra e Sarangi (2020), através de fluidodinâmica computacional (CFD), projetaram seis secadores de bandeja para secagem de biomassa, na qual foi possível concluir que aumentando o comprimento das bandejas houve um incremento da superfície de contato, gerando 45% de acréscimo na taxa de transferência de calor. Ademais, uma melhor disposição

das bandejas trouxe um aprimoramento de 60% na mesma taxa. Métodos alternativos para a previsão de resultados numéricos tiveram uma discrepância máxima de 3,5%.

Stoppe, Neto e Santos (2020) também utilizaram de fluidodinâmica computacional para o desenvolvimento de um secador solar de leito fixo voltado para secagem de sementes de soja; através desse método de resolução numérica, experimentaram diferentes configurações de alimentação de ar, com entrada total e parcialmente abertas, onde visualizaram perfis de velocidade e temperatura, e com isso foi possível configurar os parâmetros para aprimoramento em 300% da taxa de secagem, comprovando que modificações propostas por meio de simulações de fluidodinâmica computacional podem ser úteis para aprimorar a taxa de secagem ao modificar a dinâmica do fluido de ar e, conseqüentemente, os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa.

O estudo abordará a criação de modelos computacionais que simulem por meio de CFD o perfil de temperatura de um forno de secagem de biomassa localizado em uma indústria têxtil em São Luís – MA. Para tanto, se empregará designs variantes a fim de obter-se uma alternativa para melhor aproveitamento energético e intensidade térmica.

A análise partiu da construção de três estruturas geométricas para três designs de fornos, com o primeiro sendo semelhante ao forno da indústria têxtil, enquanto os outros dois constituem variações. Após, foi estabelecido três condições de velocidade de alimentação e temperatura inicial, proporcionando 27 simulações numéricas.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Aprimorar o design de um secador industrial utilizando fluidodinâmica computacional.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Validar a simulação CFD de forno de secagem industrial com dados experimentais e propor dois designs alternativos.
- Modelar e simular os fornos de secagem propostos.
- Analisar perfil de temperatura transiente e estacionária ao longo do forno de secagem.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A avaliação de um projeto de forno de secagem requer a compreensão dos fenômenos que regem essa operação unitária, bem como o entendimento das condições que os afetam. Subsequentemente, a aplicação de ferramentas de fluidodinâmica computacional demanda familiaridade com a formulação de equações físicas governantes para a resolução numérica.

#### 3.1 SECAGEM

A secagem é utilizada na indústria química para as mais variadas finalidades, desde controle de qualidade (para atingir alguma textura ou estrutura específica) até a diminuição no custo de transporte e armazenagem, assim como para estabilizar ou remover resíduos tóxicos. O termo secagem, embora definido genericamente como remoção de umidade de uma substância, é aplicado na prática como o processo de eliminação da água através do ar (GEANKOPLIS, 1998). A umidade contida no sólido ou solução líquida exerce uma pressão de vapor dependendo da natureza dos compostos e temperatura, estando o objeto da secagem exposto a um gás contendo uma outra quantidade de pressão de vapor, ocorrerá uma transferência de umidade entre as fases até ambas pressões de vapor se igualarem.

A relação entre o teor de umidade de equilíbrio de um sólido e a temperatura é caracterizada pela diminuição do teor de umidade à medida que a temperatura aumenta. Entretanto, muitos materiais não possuem relações empíricas estabelecidas para essa interação e, consequentemente, os dados referentes ao teor de umidade de equilíbrio precisam ser obtidos por meio de experimentação. Além disso, é importante destacar que variações podem ocorrer mesmo entre amostras do mesmo tipo de material, adicionando uma camada de complexidade ao processo de determinação desses valores. (GEANKOPLIS, 1998).

Ao projetar uma operação de secagem, a fim de obter resultados satisfatórios, é necessário realizar o dimensionamento do secador, isto é, suas dimensões físicas, o peso do sólido úmido, o estudo das diferentes condições de umidade, qual a temperatura do ar a ser empregada e o tempo que será necessário para atingir o percentual de umidade desejado.

É crucial garantir que as amostras sejam expostas a condições de transferência de calor similares, e que o ar circundante apresente uniformidade na umidade, velocidade e temperatura.

Observando a quantidade de umidade removida do sólido úmido através do tempo, é possível acompanhar os diferentes períodos de secagem.

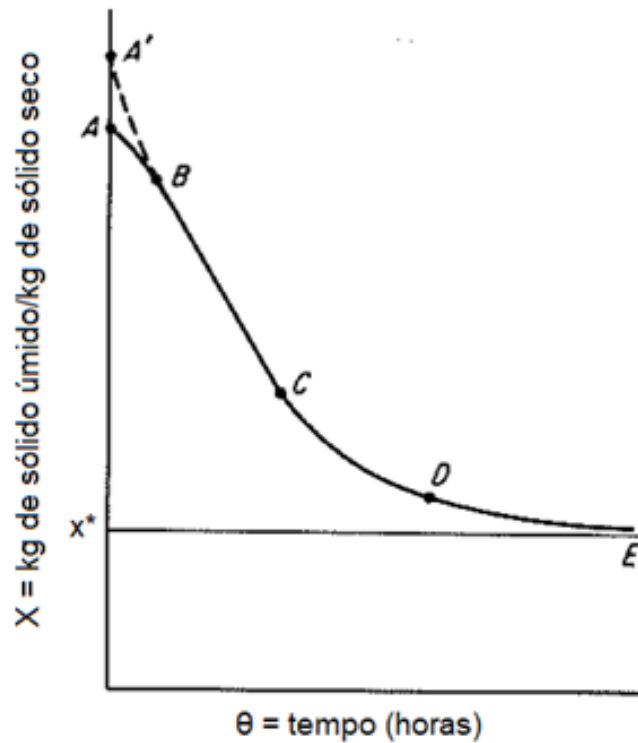
Através desses dados também é possível obter a taxa de secagem, expressa como:

$$N = \frac{\text{massa}}{\text{area} \cdot \text{tempo}} \quad (3.1)$$

A taxa de secagem constante é determinada a partir de:



Figura 3.1 – Gráfico da secagem em condições constantes



Fonte: TREYBAL (1980) adaptado.

$$N = \frac{-S_s \Delta x}{A \Delta \theta} \quad (3.2)$$

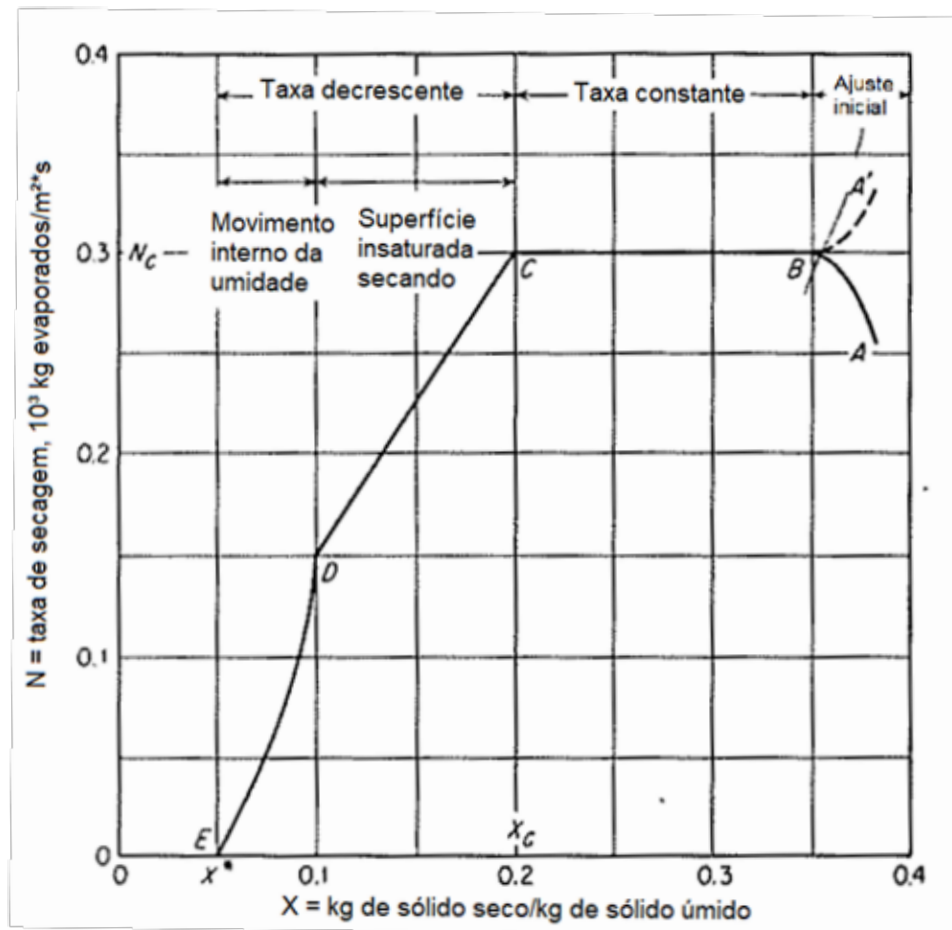
Sendo  $\Delta x$  a variação do sólido úmido sobre sólido seco e  $\Delta \theta$  a variação do tempo, tem-se  $S_s$  como massa final do sólido seco e  $A$ , a área úmida da superfície que está em contato com o vapor de secagem (TREYBAL, 1980). No 3.2, as fases distintas da secagem se tornam mais evidentes quando comparamos a taxa de secagem em relação à massa de água, por unidade de massa de sólido seco. Estas duas fases principais são identificadas como taxa de secagem constante e a taxa de secagem decrescente. Embora a forma da curva na fase de secagem decrescente possa variar conforme o material e as condições de secagem específicas, é recorrente a presença desse declínio na taxa de secagem.

Considerando um sólido com elevado teor de umidade, a ponto de que sua superfície contenha uma fina camada de filme líquido, quando exposto ao ar seco, terá a evaporação desse líquido iniciada a partir da superfície. Essa taxa de evaporação pode ser descrita a partir do coeficiente de transferência de massa  $K$ ; a diferença da umidade do gás na interface líquida será descrita como  $Y_s - Y$ , sendo  $Y_s$  a umidade da superfície líquida do sólido, e  $Y$ , a umidade da corrente. Temos que:

$$N_c = K(Y_s - Y) \quad (3.3)$$

$K$  é esperado manter-se constante, considerando que não haja alteração na velocidade ou direção

Figura 3.2 – Gráfico da taxa de secagem em condições constantes.



Fonte:

(TREYBAL, 1980) adaptado.

do gás. A umidade  $Y_s$ , sendo a umidade saturada no líquido-superfície em temperatura  $t_s$ , poderá variar de acordo com essa temperatura. Como a evaporação de umidade absorve calor latente, a superfície líquida tende a permanecer em temperatura de equilíbrio, enquanto a taxa de fluxo de calor da região próxima à superfície se iguala à taxa de absorção de calor, configurando  $Y_s$  como constante.

Como  $Y$  não varia em condições constantes de secagem, a taxa de evaporação também é constante no valor  $N_c$  como pode ser visto entre os pontos B e C do 3.2.

Na etapa inicial do processo, quando tanto o sólido quanto a superfície líquida estão abaixo da temperatura crítica ( $T_s$ ), há um aumento notável na taxa de evaporação e na temperatura da superfície. No entanto, devido a sua brevidade, esse período costuma ser desconsiderado em análises subsequentes dos tempos de secagem, uma vez que cede rapidamente espaço para fases mais substanciais do processo.

Assim que a umidade média presente no sólido atinge o ponto  $X_c$ , definido como umidade crítica, a camada de umidade na superfície do sólido se reduz a tal grau que manchas de material seco começam a emergir na superfície. Essas manchas tendem a crescer em dimensão à medida que o processo de secagem prossegue. Ao atingir o estágio D, toda essa umidade média

na superfície do sólido terá evaporado.

Conforme o processo de secagem continua, a velocidade com que a umidade (taxa de movimento interno) consegue se deslocar através do sólido diminui, visto que a sua concentração de umidade decresce ao longo do tempo. Chegando ao ponto E, o teor de umidade no sólido alcança o valor  $X^*$ , equivalente à umidade do ar circundante, sinalizando assim o término do processo de secagem.

No entanto, há muitos casos em que a velocidade de deslocamento da umidade é ditada, durante o período de velocidade decrescente, pela velocidade de movimento interno do líquido por difusão líquida, ou por movimento capilar. Quando a difusão líquida de umidade controla a velocidade de secagem no período de velocidade decrescente, as equações de difusão podem ser aplicadas. Usando as concentrações como  $X$  kg de umidade livre/kg de sólido seco, em vez das concentrações em kg de umidade/m<sup>3</sup>, a segunda lei de Fick para difusão em estado não estacionário da equação pode ser escrita como:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_L \frac{d^2 X}{dx^2} \quad (3.4)$$

onde  $D_L$  é o coeficiente de difusão líquida em m<sup>2</sup>/h e  $x$  é a distância no sólido em metros. Esse tipo de difusão é característico de secagens relativamente lentas de materiais não granulares, como sabão, gelatina e adesivos, assim como nas últimas etapas do secamento de água combinada em argilas, madeira, têxteis, couro, papel, alimentos, amidos e outros sólidos hidrofílicos.

Existem diversos fatores que influenciam diretamente o período de duração e o perfil da secagem. Pode se mencionar configurações como as dimensões espaciais do equipamento, a temperatura empregada e a velocidade da corrente de ar que desempenham papéis significativos. Nesse contexto, Nóbrega (2012), ao analisar a secagem de resíduos da acerola (*Malpighia emarginata*), procedeu seus experimentos mediante a variação dos elementos supramencionados, obtendo uma série de resultados distintos, conforme se observa na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados da secagem de resíduos de acerola.

Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	Espessura da torta de resíduo (cm)	Tempo (min)
6	60	0,75	240
4	80	0,60	160
4	80	0,75	220
6	80	0,50	160
6	80	0,75	160

Fonte: Nóbrega (2012) adaptado.

Costa (2008) conduziu experimentos de secagem utilizando cascas de banana, outro tipo de material orgânico, os resultados obtidos indicam que o aumento da temperatura influencia diretamente o tempo necessário para a secagem. No entanto, a exposição prolongada do resíduo a esse processo culminou na promoção da reação de Maillard, resultando em um escurecimento do material e na consequente deterioração de sua qualidade.

Situação semelhante foi identificada por Nogueira (2011) ao investigar a secagem e carbonização de castanhas em ambientes florestais. Observou-se que a utilização de temperaturas superiores a 50°C resultava em uma redução no intervalo de tempo de secagem entre 2 a 4 horas. Contudo, a prática também gerava rachaduras no tegumento das castanhas, comprometendo sua viabilidade para certas aplicações tecnológicas.

Considerando a relevância de aprimorar o tempo de secagem enquanto se preservam as qualidades do material, sem comprometer suas características desejadas, torna-se imprescindível a análise de perfil de temperatura para operações industriais.

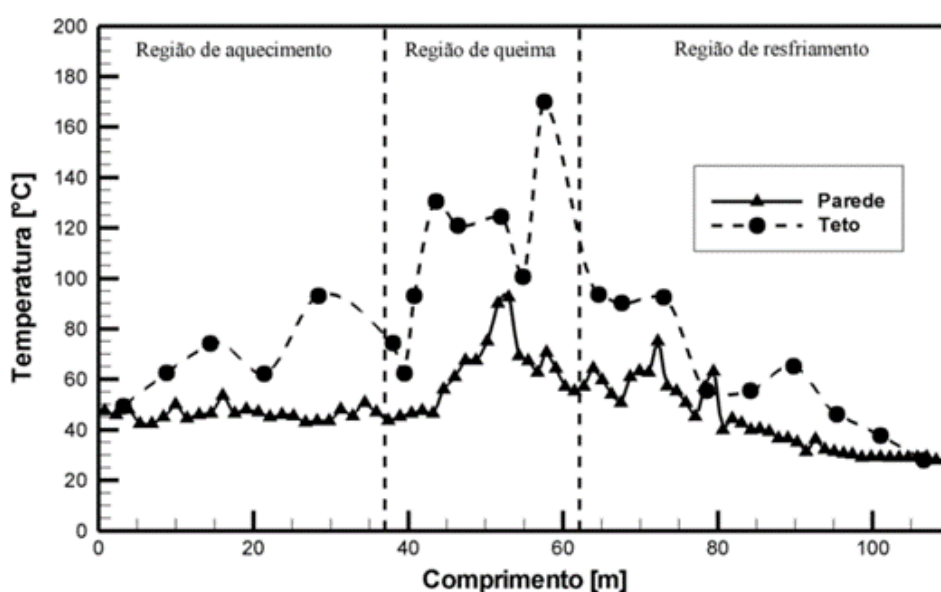
### 3.2 PERFIL DE TEMPERATURA

Dado que as taxas e os intervalos de secagem estão intimamente ligados à temperatura, surge a necessidade de avaliar o perfil de temperatura do ambiente onde o fenômeno ocorrerá.

Em que pese o dimensionamento físico do equipamento de secagem, é crucial reconhecer que diferentes partes do equipamento podem experimentar variações na temperatura, gerando um gradiente térmico. Portanto, o conhecimento detalhado do perfil de temperatura não se restringe apenas à compreensão do ambiente, mas também se estende ao gerenciamento do posicionamento do material sólido que está sendo submetido ao processo de secagem.

Conforme a literatura especializada, Oba (2011) realizou um estudo de forno de telhas cerâmicas na qual traçou o perfil de temperatura da parede e do teto do forno através do comprimento, assim como a temperatura dos gases. Em suas conclusões, o autor assevera que o estudo térmico experimental e o respectivo levantamento de dados foram decisivos para a compreensão do funcionamento do forno e ainda serviram como referência para calibração dos modelos numéricos auxiliares.

Figura 3.3 – Gráfico da temperatura das paredes externas e do teto ao longo do forno.



Fonte: (OBA, 2011).

Esses perfis de temperatura desempenham um papel crucial não apenas na caracterização térmica, mas também na identificação de perdas energéticas e na determinação da relação ideal entre ar e combustível (LIRA, 2007). Essa análise térmica permite não apenas otimizar a eficiência do processo, mas também auxilia na avaliação precisa das condições operacionais, garantindo um desempenho mais econômico e sustentável.

### 3.3 ANÁLISE NUMÉRICA

O objetivo dos métodos numéricos é a resolução de uma ou mais equações diferenciais, através da substituição das derivadas presentes na equação por expressões algébricas adequadas. Ao realizar uma aproximação de uma equação diferencial, concorda-se em obter a solução em um conjunto discreto de pontos, com a expectativa de que, à medida que se aumenta a densidade desses pontos, a solução obtida esteja cada vez mais próxima da solução exata (MALISKA, 2004).

Para realizar a discretização do domínio de interesse, empregam-se coordenadas ortogonais, tais como cartesianas, triangulares, cilíndricas ou esféricas, conforme usual nos exemplos bidimensionais. No contexto do estudo de Fluidodinâmica computacional (CFD), essa grade de coordenadas é frequentemente denominada "malha". Esse padrão de malha desempenha um papel fundamental no CFD, pois ajuda a dividir o domínio de interesse em elementos manejáveis que permitam a representação e análise mais precisa do comportamento dos fluidos.

Figura 3.4 – Representação de discretização numérica.



Fonte: (GOMES, 2013) adaptado.

A precisão da solução aumenta à medida que a malha se torna mais refinada, ou seja, quanto maior o número de células na malha. No entanto, esse aumento na precisão vem acompanhado de um aumento no tempo computacional necessário e nos custos associados.

#### 3.3.1 Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional é uma das formas de utilização de métodos numéricos a fim de investigar os comportamentos dos fluidos em sistemas diversos. Através da simulação por meio de software e processamento computacional, é possível obter resultados que se aproximam da realidade, permitindo a visualização e análise de fenômenos fluidodinâmicos.

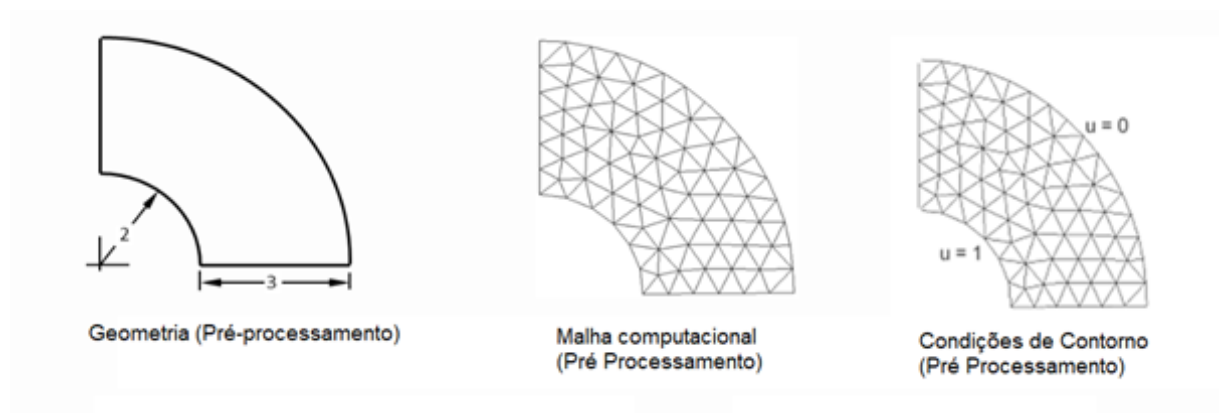
A obtenção da solução computacional de qualquer problema físico requer a habilidade de criação do modelo matemático correspondente, e para isso o fornecimento de informações

necessárias deve ser compatível com o nível no qual os balanços de conservação devem ser realizados.

O desenvolvimento de uma modelagem por CFD é constituído por três etapas:

- Pré-processamento (3.5): Na qual ocorre a configuração inicial a partir de um modelo 2D ou 3D do objeto de estudo e a partir disso a discretização da geometria em malha computacional mediante uma rede de elementos finitos. Posteriormente, parte-se para a definição de condições iniciais e de contorno, tais quais propriedades do fluido (densidade, velocidade, viscosidade, temperatura) e da geometria.

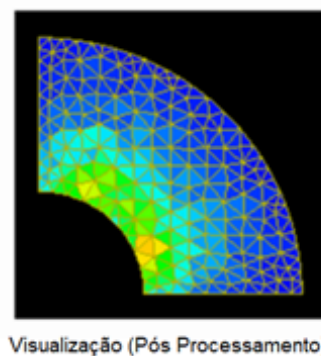
Figura 3.5 – Representação das etapas de Pré-Processamento



Fonte: (CCTECH, 2006) adaptado.

- Solver: as resoluções das equações matemáticas que descrevem o comportamento do fluido são resolvidas numericamente em cada elemento da malha, por meio de métodos dos elementos finitos, volumes finitos ou diferenças finitas.
- Pós-processamento (3.6): etapa em que os resultados são visualizados, assim como distribuição de pressão, temperatura, velocidade ou outras propriedades. Figura 6

Figura 3.6 – Representação das etapas de Pós-Processamento.



Fonte: (CCTECH, 2006) adaptado.

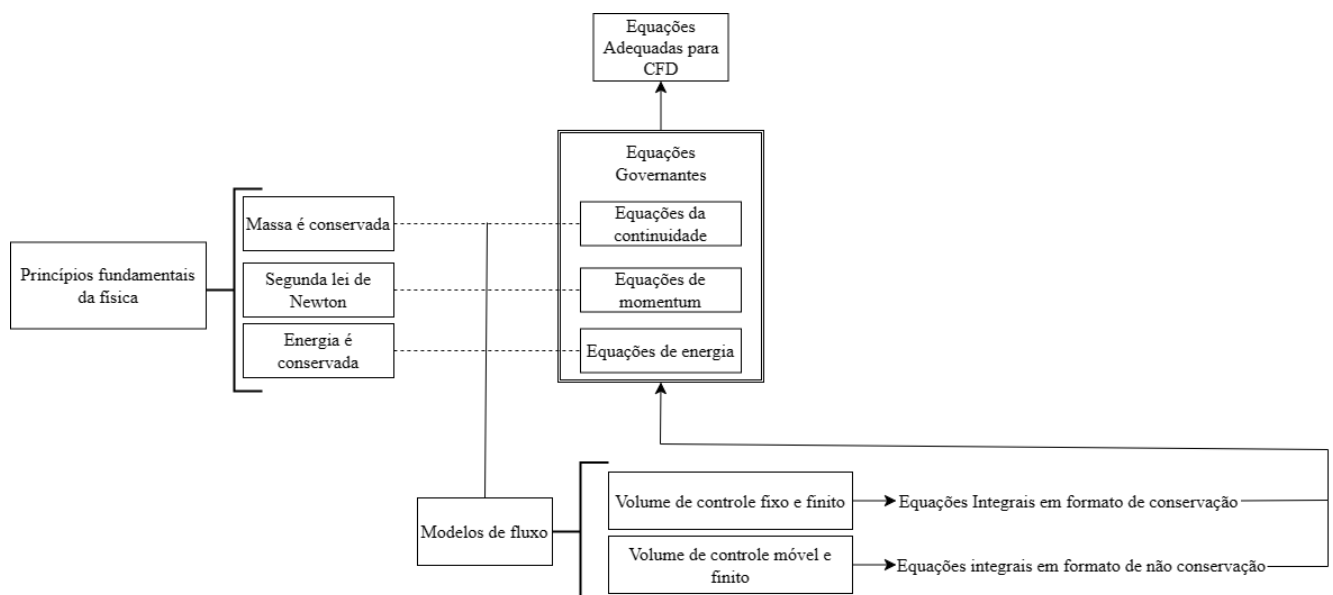
### 3.3.2 Equações Governantes

As equações fundamentais (governantes) da fluidodinâmica baseiam-se em princípios físicos de continuidade, momentum e energia:

- (i) Massa é conservada.
- (ii) Segunda Lei de Newton ( $F = ma$ ).
- (iii) Energia é conservada.

O mapa mental na figura 3.7 ilustra os caminhos para as equações governantes através dos princípios físicos, através dos modelos de análise de fluídos.

Figura 3.7 – Mapa Mental da Análise Numérica da Fluidodinâmica



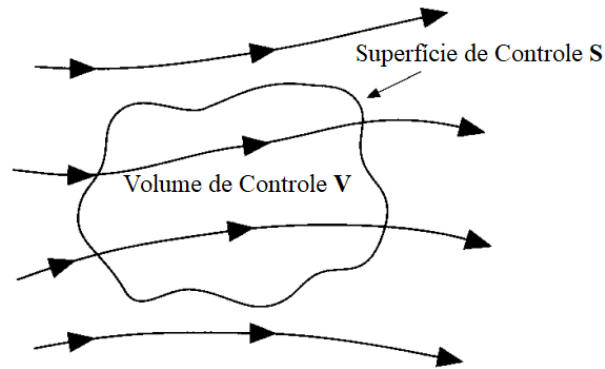
Fonte: (ANDERSON, 1996) adaptado.

#### 3.3.2.1 Volume dos Controles Finitos

Após o estabelecimento dos princípios físicos previamente mencionados, deve-se aplicar suas equações à um modelo numérico.

Considere um campo de fluido representado pelas setas da figura 3.8 com um volume de controle finito  $V$ . A superfície de controle  $S$  delimita a região, enquanto  $V$  pode ser definido como região fixa, com o fluido movendo-se através de si, ou como região móvel, acompanhando o movimento do fluido. As equações fundamentais são aplicadas no fluido dentro do volume de controle e no fluido atravessando a superfície de contorno  $S$ . Essas equações são obtidas diretamente ao integrar o volume de controle aplicando esses princípios fundamentais da física no volume  $V$ . Essas integrais podem ser manipuladas para indiretamente obter-se equações diferenciais parciais.

Figura 3.8 – Representação de um Volume de Controle Fixo e Finito.



Fonte: (ANDERSON, 1996) adaptado.

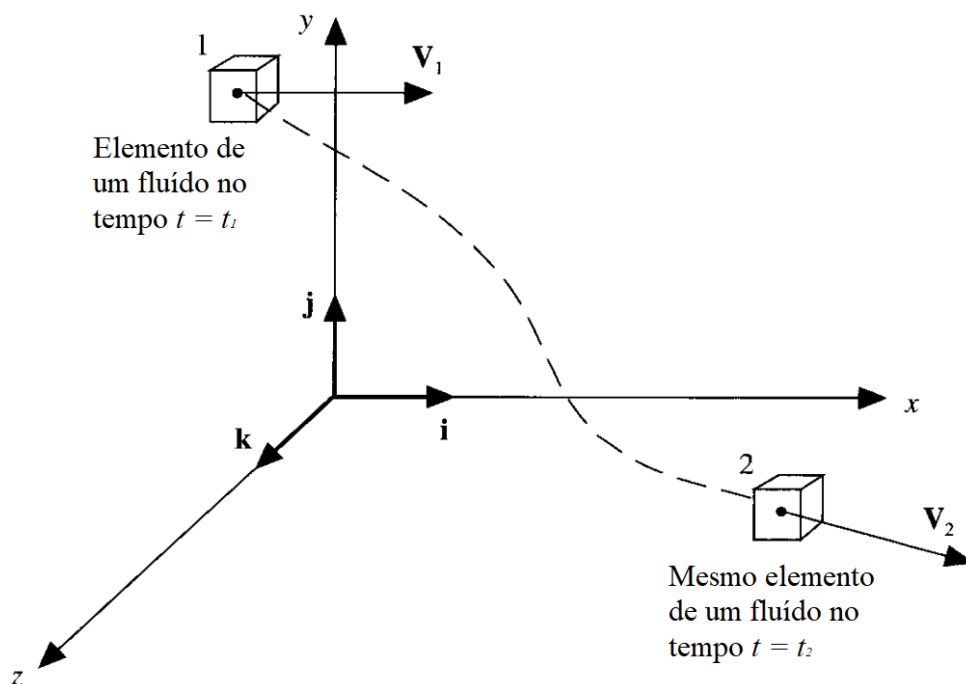
As equações obtidas através de um volume finito fixado no espaço são chamados de equações governantes de conservação (conservation form of the governing equations), enquanto as equações obtidas em um volume de controle finito movendo-se com o fluido são chamadas de equações governantes de não-conservação (nonconservation form of the governing equations).

### 3.3.2.2 Derivada Substancial para Equações Governantes

Supõe-se um elemento de fluido infinitesimal movendo-se através de um espaço cartesiano (Figura 3.9), com vetores  $i$ ,  $j$  e  $k$  ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . O vetor do campo de velocidade no espaço cartesiano é dado por:

$$V = ui + vj + wk \quad (3.5)$$

Figura 3.9 – Ilustração de um elemento de fluido movendo-se entre pontos.



Fonte: (ANDERSON, 1996) adaptado.



Onde os componentes de velocidade de  $x$ ,  $y$  e  $z$  são funções de espaço e tempo dadas por:

$$u = u(x, y, z, t)$$

$$v = v(x, y, z, t)$$

$$w = w(x, y, z, t)$$

Considerando a densidade escalar como  $\rho = \rho(x, y, z, t)$ , obtém-se:

$$\text{no tempo } t_1 : \rho_1 = \rho(x_1, y_1, z_1, t_1)$$

$$\text{no tempo } t_2 : \rho_2 = \rho(x_2, y_2, z_2, t_2)$$

É possível expandir essas funções com a série de Taylor, e dividindo por  $t_2 - t_1$  e ignorando termos de maior ordem, têm-se:

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} = \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_1 \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} \right)_1 \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)_1 \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_1 \quad (3.6)$$

O lado esquerdo da equação é o tempo médio da mudança de densidade enquanto o elemento move-se do ponto 1 para 2, e enquanto  $t_2$  aproxima-se de  $t_1$ , temos:

$$\lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left( \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} \right) = \frac{D\rho}{Dt} \quad (3.7)$$

Onde  $\frac{D\rho}{Dt}$  representa a taxa de mudança de densidade instantânea do elemento de fluido enquanto ele se move do ponto 1, conhecido como derivada substancial. Deve-se notar que  $\frac{D\rho}{Dt}$  descreve unicamente a mudança de densidade no elemento, enquanto a mudança de densidade do ponto de forma estacionária é definida como  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ , sendo fisicamente e numericamente diferentes entre si.

Aplicando limite nos membros da equação 3.6 é possível notar que:

$$\begin{aligned} \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left( \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \right) &= u \\ \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left( \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right) &= v \\ \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left( \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right) &= w \end{aligned}$$

Assim, pode-se obter a derivada substancial em coordenadas cartesianas:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial}{\partial y} \right) + w \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

Para coordenadas cartesianas, o vetor gradiente  $\nabla$  é definido como:

$$\nabla = i \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) + j \left( \frac{\partial}{\partial y} \right) + k \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (3.9)$$

O que torna possível escrever a equação 3.8 como:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (V \cdot \nabla) \quad (3.10)$$

Além da derivada substancial, têm-se agora  $\frac{\partial}{\partial t}$ , chamada de derivada local e  $(V \cdot \nabla)$ , chamada de derivada convectiva. Essa última trata fisicamente da taxa de mudança temporal devido ao movimento do elemento de um local para o outro no campo de fluxo, onde as propriedades do fluxo são espacialmente diferentes.

A derivada substancial aplica-se para quaisquer variáveis no campo do fluido, como pressão ou temperatura. Por exemplo (3.11), é possível afirmar fisicamente que ocorre alteração na temperatura de um elemento do fluido à medida que ele passa por um ponto porque nesse ponto a própria temperatura pode estar flutuando com o tempo (derivada local) e porque o elemento está apenas a caminho de outro ponto no campo de fluxo onde a temperatura é diferente (derivada convectiva).

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + (V \cdot \nabla) = u \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.11)$$

### 3.3.2.3 Síntese das Equações Governantes para Fluidodinâmica - Navier-Stokes

Aplicando os princípios físicos ao modelo de volume finito é possível obter o conjunto de equações de continuidade, momentum e energia, utilizadas para descrever diferentes fenômenos que servirão de base para estudos fluidodinâmicos e de solução numérica computacional. Embora existam equações de continuidade para fluidos invíscidos (não viscosos) através das equações de Euler, o presente tópico limita-se às equações de fluidos viscosos, descrito pelas equações de Navier-Stokes.

Fluido viscoso é aquele que carrega fricção, condutividade térmica e/ou difusão mássica. As equações governantes de conservação (volume de controle fixo) em modelo de volume finito para um fluido viscoso não estacionário, tridimensional, compressível estão dispostos na tabela 3.2:

### 3.3.2.4 Método numérico de Large Eddy Simulation (LES)

A Simulação de Grandes Vórtices (LES, na sigla em inglês) é um dos métodos de resolução numérica das equações de Navier-Stokes mais promissores para calcular fluxos turbulentos relevantes para a indústria (MCGRATTAN et al., 2023). É empregada para prever comportamentos de fluxo instáveis com um custo computacional menor em comparação com a Simulação Numérica Direta (DNS).

Existem quatro fundamentos (POPE, 2000) para resolução por LES:

Tabela 3.2 – Equações de Navier-Stokes.

Equação da Continuidade:  $\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot V = 0$

Equações de Momentum:

$$\begin{aligned}\frac{D(\rho u)}{Dt} + \nabla \cdot (\rho u V) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{D(\rho v)}{Dt} + \nabla \cdot (\rho v V) &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{D(\rho w)}{Dt} + \nabla \cdot (\rho w V) &= -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z\end{aligned}$$

Equação de Energia:

$$\begin{aligned}& \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] \\ &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & - \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f_v\end{aligned} \tag{3.12}$$

Fonte: (ANDERSON, 1996).

- (i) Um 'filtro' é aplicado para decompor a velocidade  $U(x,t)$  em uma soma de componentes filtrados (ou resolvidos numericamente)  $\bar{U}(x,t)$  e um componente resíduo  $u'(x,t)$ . O campo vetorial de velocidade filtrado (tridimensional e dependente de tempo) representa o movimento dos grandes vórtices (large eddies).
- (ii) A equação para o filtro de velocidade é derivado das equações de Navier-Stokes;
- (iii) O contorno deriva de um modelo de viscosidade turbulenta;
- (iv) As equações filtradas são resolvidas numericamente para  $\bar{U}(x,t)$  fornecendo uma aproximação dos movimentos em grande escala.

Em síntese, é suficiente considerar para o presente trabalho que os campos filtrados nas equações LES como média das células da malha computacional. Por exemplo, em 1D, a densidade filtrada para uma célula de largura  $\Delta$  é:

$$\bar{\rho}(x,t) = \frac{1}{\Delta} \int_{x-\frac{\Delta}{2}}^{x+\frac{\Delta}{2}} \rho(r,t) dr \quad (3.13)$$

### 3.3.3 Fire Dynamics Simulator, Smokeview e Pyrosim

Fire Dynamics Simulator (FDS) é um programa que resolve numericamente as equações de Navier-Stokes, seu principal uso é para estudos de transporte de fumaça e calor de incêndios, com fluxos térmicos de baixa velocidade (MCGRATTAN, 2021). Os dados de geometria, malha e condições de contorno (etapas equivalentes ao pré-processamento) são indicados em um arquivo de texto no formato .fds. Esse arquivo pode ser criado manualmente usando um editor de texto ou por meio de uma interface gráfica de usuário (GUI) de terceiros, como o Pyrosim, da empresa Thunderhead Engineering. A leitura e cálculo de solução numérica para equações governantes, assim como a exportação de dados de saída especificados pelo usuário em outros arquivos é realizada pelo Fire Dynamic Simulator, que atua como software Solver através do prompt de comando do próprio sistema operacional do usuário.

Para a etapa de pós-processamento utiliza-se o Smokeview, um programa complementar que lê arquivos de saída .fds e produz resultados visuais como animações e gráficos. Outras interfaces gráficas integradas com o Fire Dynamic Simulator e Smokeview podem servir de alternativa para visualização de resultados.

Lançados inicialmente em 2000, os dois softwares foram codificados com a estrutura hidrodinâmica desenvolvida no NIST (National Institute of Standards and Technology) em décadas anteriores. A primeira versão tinha como objetivo simular grandes escalas de fogo e fumaça, em suas versões posteriores foram inseridos princípios básicos de combustão e dados para resolução de métodos de volumes finitos envolvendo radiação (MCDERMOTT, 2019). Durante as investigações do NIST do atentado ao World Trade Center e incêndio do Station Nightclub, FDS e Smokeview receberam novos incrementos para melhor suportar fatores como hidrodinâmica, dados químicos e cálculos envolvendo múltiplas malhas.

#### 3.3.3.1 LES-FDS

Os parâmetros de resolução numérica por meio de LES através do Fire dynamic simulator determina que a largura do filtro seja considerado como a raiz cúbica do volume da célula,  $\Delta = Vc^{\frac{1}{3}}$ , onde  $Vc = \delta x \delta y \delta z$ . A prática de adotar  $\Delta = \delta x$  é chamada de filtragem implícita. O FDS utiliza esquemas de diferenças centrais de conservação de energia cinética para o momentum, com contornos físicos próprios para o estresse turbulento. Por fim, para qualquer campo contínuo,  $\phi$ , um campo filtrado é definido como:

$$\bar{\phi}(x,y,z,t) = \frac{1}{Vc} \int_{x-\frac{\delta x}{2}}^{x+\frac{\delta x}{2}} \int_{y-\frac{\delta y}{2}}^{y+\frac{\delta y}{2}} \int_{z-\frac{\delta z}{2}}^{z+\frac{\delta z}{2}} \phi(x',y',z',t) dx' dy' dz' \quad (3.14)$$

## 4 METODOLOGIA

A presente abordagem metodológica desenvolve-se a partir 1) definição dos designs e construção de sua geometria, 2) das etapas de pré-processamento e estruturação das condições de contorno e 3) posicionamento e parametrização de sensores de monitoramento para extração de resultados numéricos.

### 4.1 MODELOS DE FORNOS DE SECAGEM

O primeiro design estabelecido baseou-se em medidas fornecidas de um forno industrial de secagem construído em uma indústria têxtil situada em São Luís, Maranhão, Brasil. As alterações realizadas de um design para outro partiram da visualização de resultados da etapa anterior, mantendo, porém, as mesmas dimensões de altura, largura e comprimento, assim como a entrada de ar inferior e de saída de ar.

#### 4.1.1 Design 1

Foi desenhado um forno com dimensões similares às do forno para secagem de resíduos de uma indústria têxtil, com forma geométrica retangular, com 7,6 m de comprimento, 2,6 m de altura e 2,4 de largura. Há uma saída de ar retangular no teto do forno com dimensões de 0,3 m por 0,5 m.

Abaixo do nível do solo foi construído um compartimento de 0,5 m de altura e as mesmas dimensões de largura e comprimento, por onde uma tubulação de circunferência de 0,4m carrega uma corrente de ar para o interior do forno, ao atravessar os orifícios que foram realizados no chão do forno de secagem.

Esses orifícios possuem 0,05m de diâmetro e são espaçados entre si em 20cm para cada direção. Outras duas entradas de ar com dimensões menores, de circunferência de 0,1m, foram posicionadas a 0,8m do nível do chão. Uma terceira, de 0,2m de circunferência, foi posicionada em seguida na mesma altura. Na figura 4.1 é possível visualizar as dimensões do primeiro design de forno, assim como as entradas e saídas de fluídos.

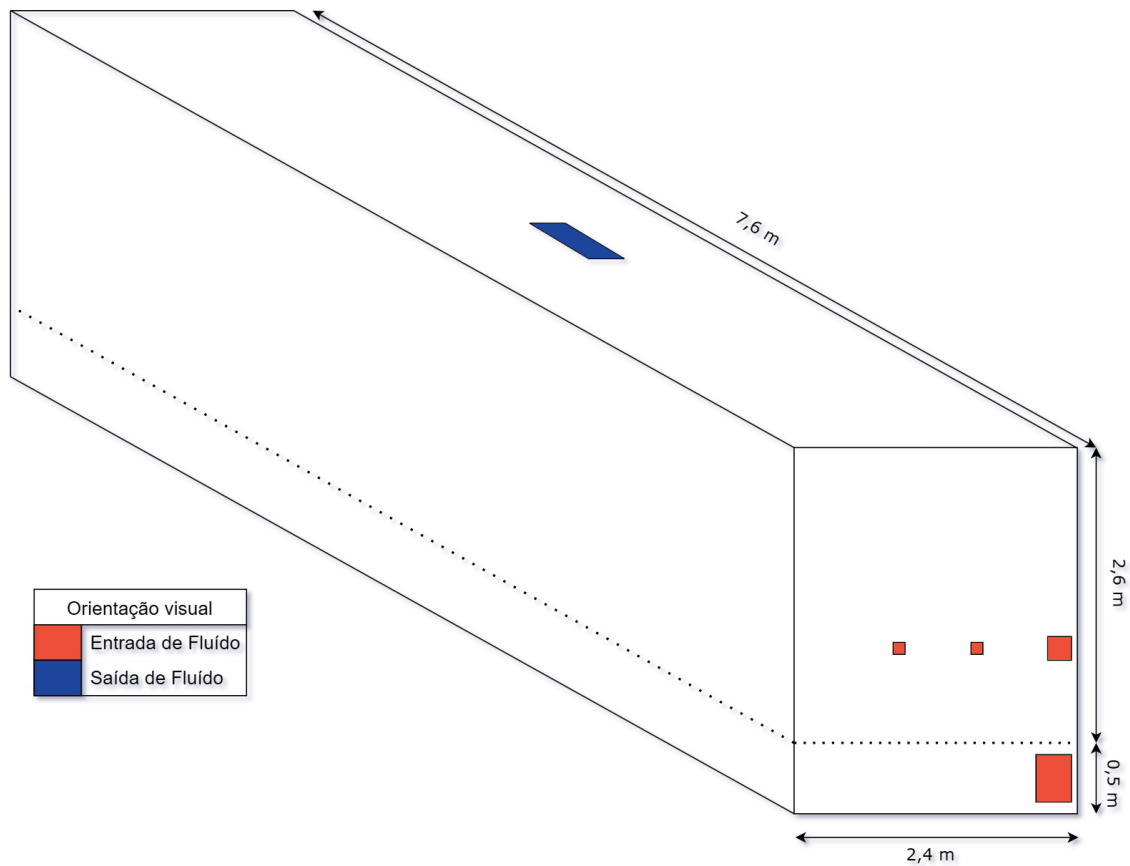
Por conta da limitação do Fire Dynamic Simulator, que utiliza somente células de malha em formato quadrangular, trabalhou-se com aproximações das áreas das entradas e dos orifícios descritos na idealização do projeto.

Os orifícios na superfície foram posicionados conforme ilustrado na figura 4.4, enquanto a visão lateral da estrutura, construída no Pyrosim, é representada na figura 4.3.

#### 4.1.2 Design 2

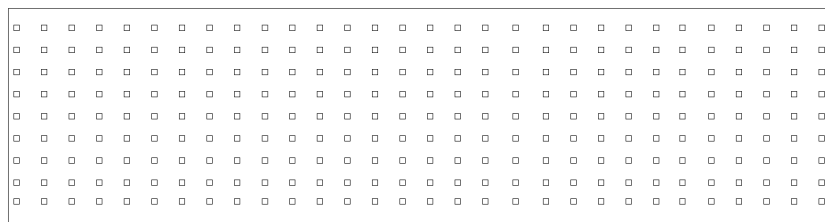
A partir da análise dos primeiros resultados obtidos através das simulações com o design 1, manteve-se as mesmas dimensões estruturais do forno de secagem, assim como as

Figura 4.1 – Representação do Design de forno 1.



Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Representação do posicionamento dos orifícios.



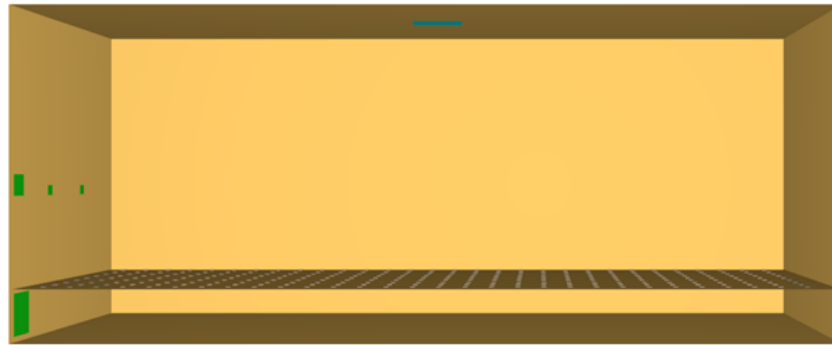
Fonte: Autor.

configurações espaciais da saída de ar e dos furos no chão. Removeu-se da geometria as três entradas de ar que estavam posicionadas a 0,8 m do chão, de forma que a única entrada de ar fosse posicionada abaixo do solo.

#### 4.1.3 Design 3

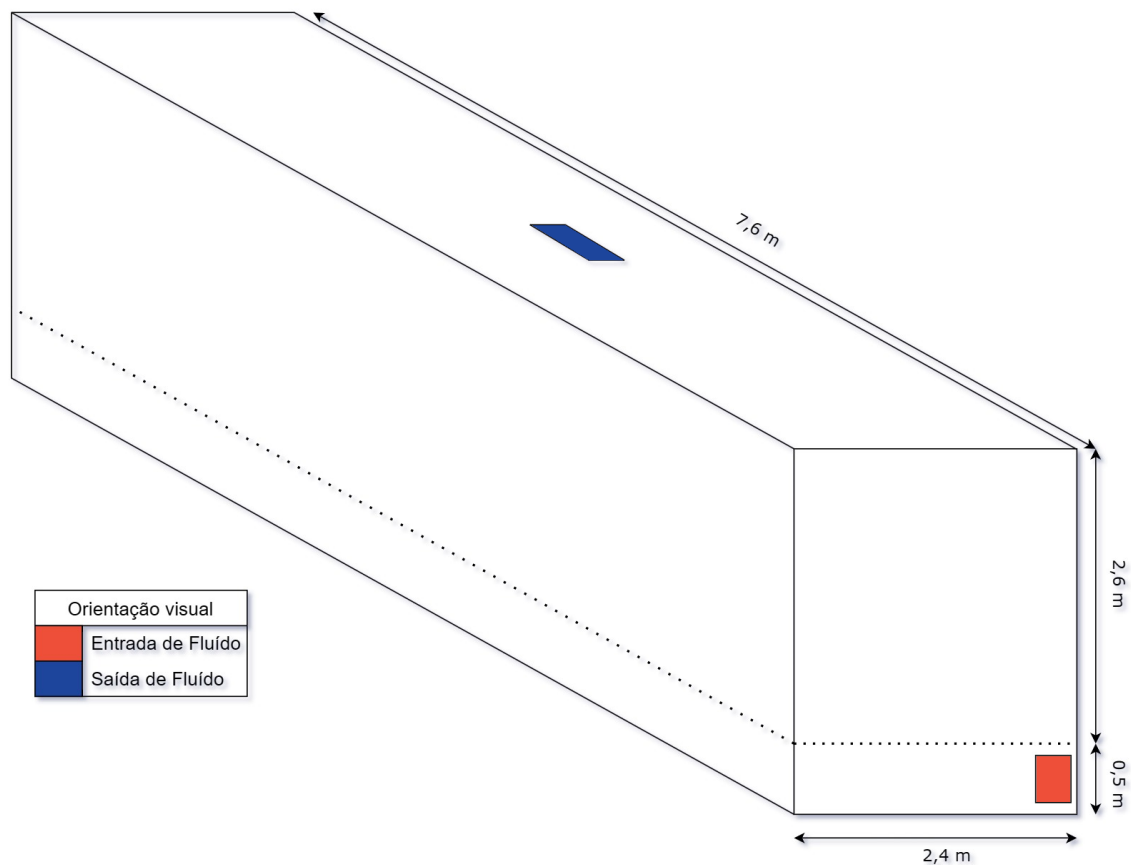
Para o terceiro design, optou-se por reintegrar as entradas de ar na parte superior conforme o design 1, mantendo as dimensões estruturais do forno e as configurações espaciais da saída de ar inalteradas. Os orifícios no solo foram eliminados a partir da distância de 3,995 m, sendo substituídos por um orifício com dimensões de 0,3 m x 2 m x 0,02 m, como ilustrado na figura 4.5.

Figura 4.3 – Visão lateral do Design 1 construído no Pyrosim.



Fonte: Autor.

Figura 4.4 – Representação do Design de forno 2.



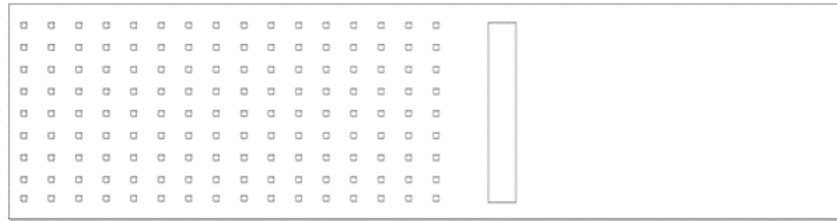
Fonte: Autor.

Na figura 4.6 observa-se a implementação de uma parede adicional para restringir o fluxo de ar sob o solo, seguindo a abertura anteriormente criada.

## 4.2 CONFIGURAÇÕES DE PRÉ-PROCESSAMENTO

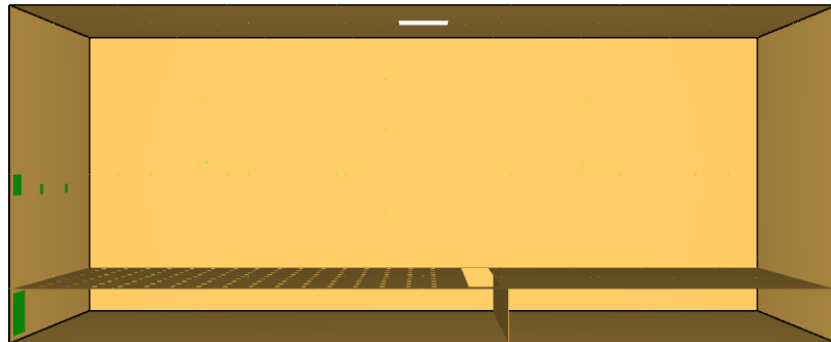
O desenvolvimento de um modelo para uma simulação de fluido dinâmica computacional constitui-se em três etapas sequenciais: Pré-processamento, Solver e Pós-processamento, conforme apresentadas na figura 4.7. Na etapa de pré-processamento construiu-se a geometria do

Figura 4.5 – Representação da disposição de superfície com orifícios e nova passagem de ar do design 3.



Fonte: Autor.

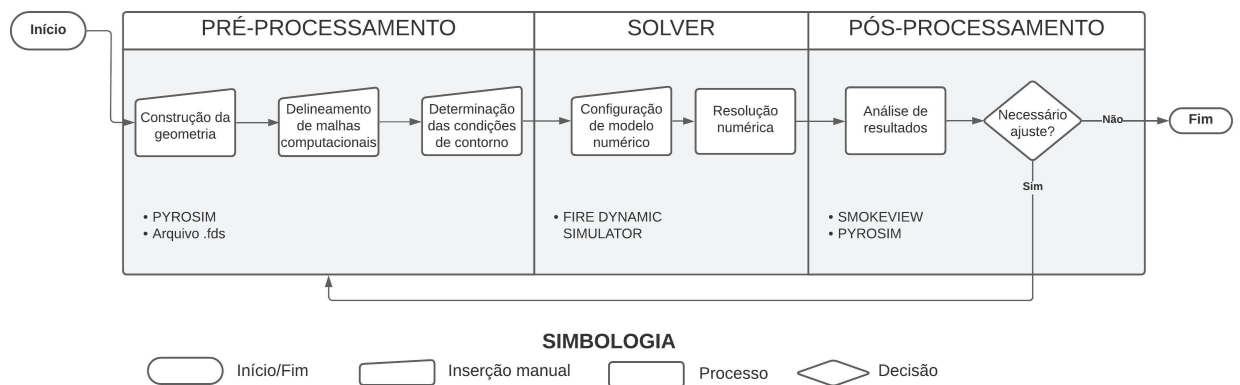
Figura 4.6 – Visão lateral do Design 3 construído no Pyrosim.



Fonte: Autor.

forno de secagem, criou-se malha numérica e definiu-se as condições de contorno do problema. O modelo foi solucionado com o solver de volume finitos em modelo Large Eddy Simulation (LES) de turbulência. As análises e tratamento dos resultados foram executados no software Smokeview e Pyrosim. O detalhamento de cada uma dessas etapas seguem descritas nos tópicos seguintes.

Figura 4.7 – Etapas de pré-processamento, solver e pós-processamento utilizadas para o desenvolvimento de um forno de secagem.



Fonte: Autor.



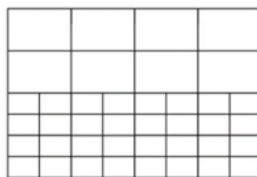
### 4.2.1 Construção da Geometria

Cada simulação do Fire Dynamic Simulator é gerenciada por um único arquivo de entrada em formato de texto com a extensão .fds. A construção dos fornos de secagem foi realizada através da interface Pyrosim, utilizando a licença acadêmica fornecida pela empresa Thunderhead Engineering. Com essa ferramenta, elaborou-se três estruturas geométricas como base para as posteriores simulações. Os comandos que estruturam os processos através do arquivo de texto podem ser encontrados no apêndice A.

### 4.2.2 Malha Computacional

Três malhas computacionais foram geradas a partir de entrada de dados na ferramenta de construção de malha do Pyrosim, sendo o primeiro comando para gerar uma que ocupe a região inferior do forno até pouco acima da superfície de posicionamento do material de secagem. Optou-se por células menores, de 0,04 m nas direções X, Y e Z para ser possível, posteriormente, visualizar com detalhes o gradiente de temperatura da superfície e o comportamento do fluido através das passagens de ar. As duas malhas seguintes, que englobam respectivamente a região mediana e superior do forno, possuem a célula computacional com os valores duplicados da primeira, ou seja, 0,08 m nas direções X, Y e Z. Essa escolha foi necessária para poupar o processamento computacional e reduzir o tempo de simulação, em que pese constar em uma região na qual a descrição minuciosa não seria necessária. É possível observar uma representação dos encontros entre as células das malhas 01 e 02 na 4.8. Após o input de dados na ferramenta do Pyrosim, o próprio software realizou um ajuste do tamanho das células no eixo Z para que não resultasse em inconsistências computacionais, tais como partes das células fora do domínio especificado ou atravessando entre si. Os detalhes de cada malha podem ser vistos na 4.9. Evidencia-se que o total de células no domínio computacional foi igual a 250.800.

Figura 4.8 – Comparativo entre os diferentes tamanhos de malha computacional utilizados.



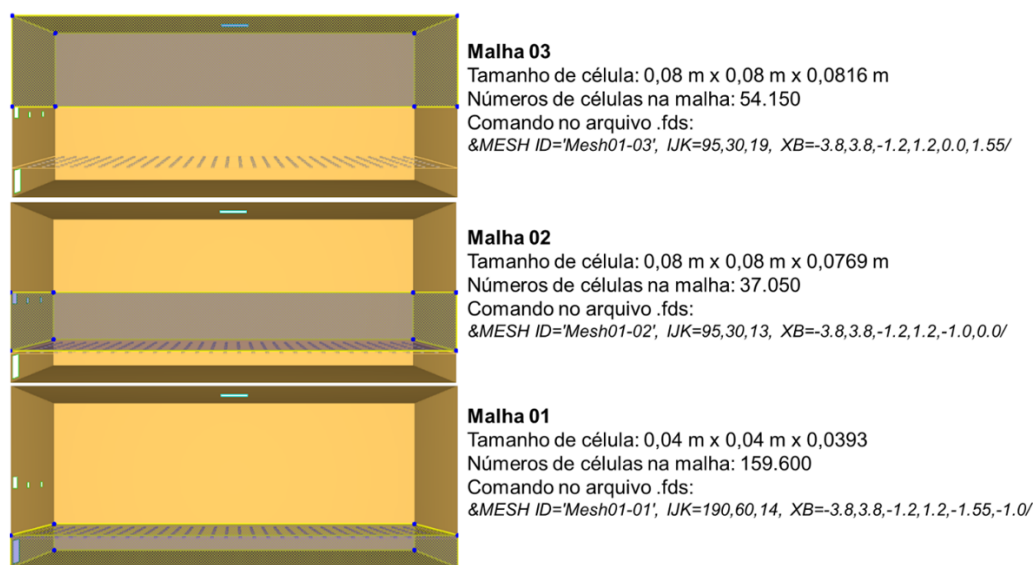
Fonte: Autor.

Fonte: Autor.

### 4.2.3 Condições de Contorno

Utilizando o software Pyrosim, produziu-se 3 estruturas geométricas baseadas nos designs de fornos de secagem. Em seguida, estabeleceu-se 3 condições iniciais potenciais de temperatura do fluido de entrada, assim como 3 velocidades potenciais para o mesmo fluido.

Figura 4.9 – Configurações de Malhas e seus posicionamentos.



Fonte: Autor.

Atribuiu-se uma tag de identificação para cada um dos modelos onde cada letra seguida de caracteres numéricos representa uma característica e seu valor: D para Design (1°, 2° ou 3°), T para Temperatura (200°C, 140°C e 120°) e V para Velocidade (7 m/s, 4 m/s ou 2 m/s).

Dessa forma, foram realizadas 27 simulações diferentes para cada uma das configurações específicas, como podem ser vistos na tabela 4.1.

Excetuando as condições iniciais abordadas de geometria, temperatura e velocidade do fluido, as configurações dispostas na Tabela 4.2 foram comuns para todos os modelos.

#### 4.2.4 Solver e Pós-Processamento

A etapa SOLVER, onde ocorre a resolução numérica das equações de estado deu-se através do software FIRE DYNAMIC SIMULATOR, acionado a partir do PYROSIM com o comando Run FDS Parallel, que permite atribuir cada malha a um núcleo de processamento disponível na máquina local, de forma que o tempo de processamento seja reduzido consideravelmente. Caso iniciado de outra forma, todos os cálculos numéricos seriam realizados por um único processador. Os resultados foram visualizados no próprio Pyrosim assim como no Smokeview.

### 4.3 SISTEMA DE MONITORAMENTO

Dois tipos de dispositivos de controle foram configurados no modelo computacional para monitoramento de temperatura: controle dinâmico e estacionário. O controle dinâmico permite o monitoramento de quantidade da propriedade ou condição e gera uma extração de dados em uma planilha .csv com a variação do parâmetro selecionado através do tempo.

Doze dispositivos de controle dinâmicos foram dispostos na mesma posição da parede

Tabela 4.1 – Lista de modelos

<b>TAG</b>	<b>DESIGN</b>	<b>TEMPERATURA</b>	<b>VELOCIDADE</b>
D1T200V7	1	200°C	7 m/s
D1T200V4	1	200°C	4 m/s
D1T200V2	1	200°C	2 m/s
D1T140V7	1	140°C	7 m/s
D1T140V4	1	140°C	4 m/s
D1T140V2	1	140°C	2 m/s
D1T120V7	1	120°C	7 m/s
D1T120V4	1	120°C	4 m/s
D1T120V2	1	120°C	2 m/s
D2T200V7	2	200°C	7 m/s
D2T200V4	2	200°C	4 m/s
D2T200V2	2	200°C	2 m/s
D2T140V7	2	140°C	7 m/s
D2T140V4	2	140°C	4 m/s
D2T140V2	2	140°C	2 m/s
D2T120V7	2	120°C	7 m/s
D2T120V4	2	120°C	4 m/s
D2T120V2	2	120°C	2 m/s
D3T200V7	3	200°C	7 m/s
D3T200V4	3	200°C	4 m/s
D3T200V2	3	200°C	2 m/s
D3T140V7	3	140°C	7 m/s
D3T140V4	3	140°C	4 m/s
D3T140V2	3	140°C	2 m/s
D3T120V7	3	120°C	7 m/s
D3T120V4	3	120°C	4 m/s
D3T120V2	3	120°C	2 m/s

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Parâmetros constantes para todos modelos

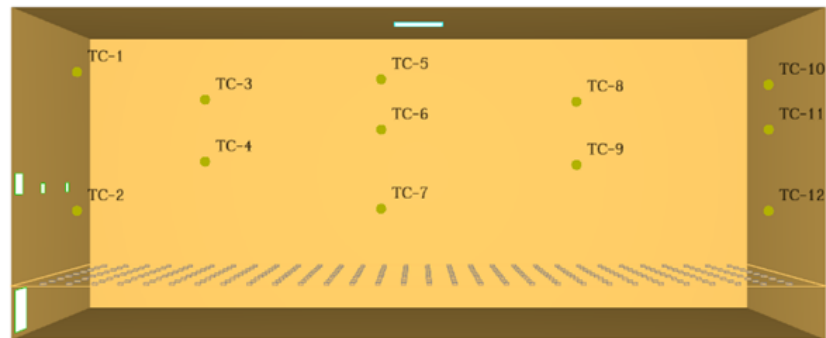
<b>TIPO DE SIMULAÇÃO:</b>	Large-Eddy Simulation (LES);
<b>SUPERFÍCIES DO FORNO:</b>	Padrão INERT do FDS
<b>TEMPERATURA INICIAL DO FORNO:</b>	35°C;
<b>NATUREZA DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO:</b>	Ar;
<b>TEMPO DE SIMULAÇÃO:</b>	420 s.

Fonte: Autor.

lateral em que termômetros foram instalados no forno da indústria têxtil, na qual o design 01 foi inspirado. Objetiva-se posteriormente a comparação dos dados experimentais com os dados calculados numericamente. A posição desses dispositivos pode ser visualizada na figura 4.10.

Para o controle estacionário, configurou-se quatro sistemas de monitoramento em formato retilíneo com 10 pontos de monitoramento ao longo de sua extensão. Esses 10 pontos

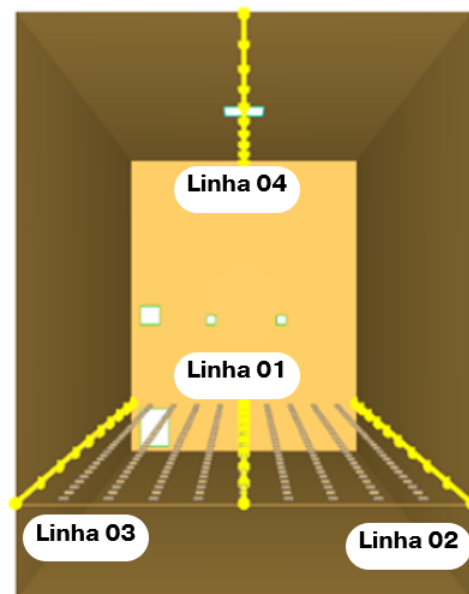
Figura 4.10 – Dispositivos de Controle para comparação com dados experimentais.



Fonte: Autor.

realizariam um controle temporal da propriedade desejada (temperatura) e o arquivo .csv gerado informaria a média de cada ponto já calculado no estado estacionário. A posição das 4 linhas de monitoramento estão conforme ilustrado na figura 4.11.

Figura 4.11 – Representação das linhas de controle estacionário.



Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS

Os perfis visuais de temperatura apresentados a seguir foram extraídos a partir do Pyrosim e Smokeview, posto que possuem a mesma gama de ferramentas. Os arquivos com os dados de temperatura dos dispositivos de controle foram gerados através do Fire Dynamic Simulator em formato .csv (comma separated value) e alimentados ao software Matlab para diagramação dos resultados. No Apêndice B estão disponibilizados todos os perfis de temperatura dos 27 modelos simulados, enquanto nos resultados escolheram-se arbitrariamente os modelos que melhor contribuam para a construção do presente estudo.

### 5.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Foram coletadas em sete instâncias dados de temperatura no forno de secagem da indústria têxtil, cujo desenho serviu de inspiração para o design 1. A tabela A do anexo A contém os resultados experimentais. Os termopares foram posicionados em locais aproximados aos dos sensores indicados na Figura 4.10. Utilizando a equação 5.1 foi calculada a média ( $A$ ) para cada ponto, enquanto a equação 5.2 foi empregada para determinar o desvio médio em cada ponto.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (5.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (5.2)$$

Sendo  $\mu$  o valor médio do conjunto de dados,  $N$  o número de valores de dados e  $x_i$  os valores dos dados no conjunto.

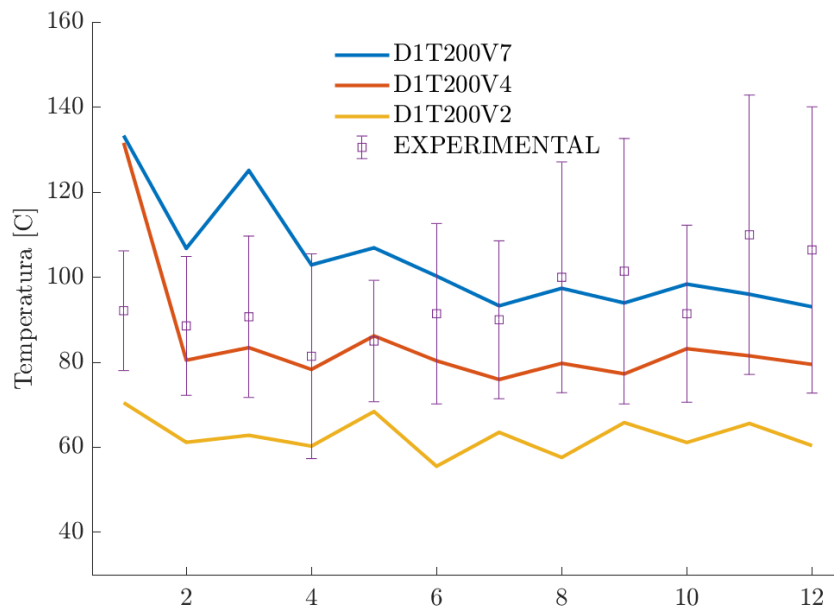
Avaliou-se a planilha de dados de temperatura por tempo gerada pelo Fire Dynamics Simulator, e calculou-se a média nos pontos indicados na figura 17 a partir do estado estacionário (após 150 segundos de simulação), os resultados de cada um dos modelos em comparação com a média experimental estão dispostos nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3.

Ao analisar os gráficos é possível perceber uma boa adequação dos modelos com a média dos resultados experimentais, principalmente os modelos D1T200V4 e D1T140V7 que se mantêm aproximados da média na maioria dos pontos. Por outro lado, todos os modelos de velocidade baixa (D1T200V2, D1T140V2 e D1T20V2) mantiveram-se fora do desvio padrão dos dados experimentais, permitindo afirmar que a velocidade de alimentação do forno real permanecia acima dos 2 m/s.

### 5.2 PERFIL DE TEMPERATURA

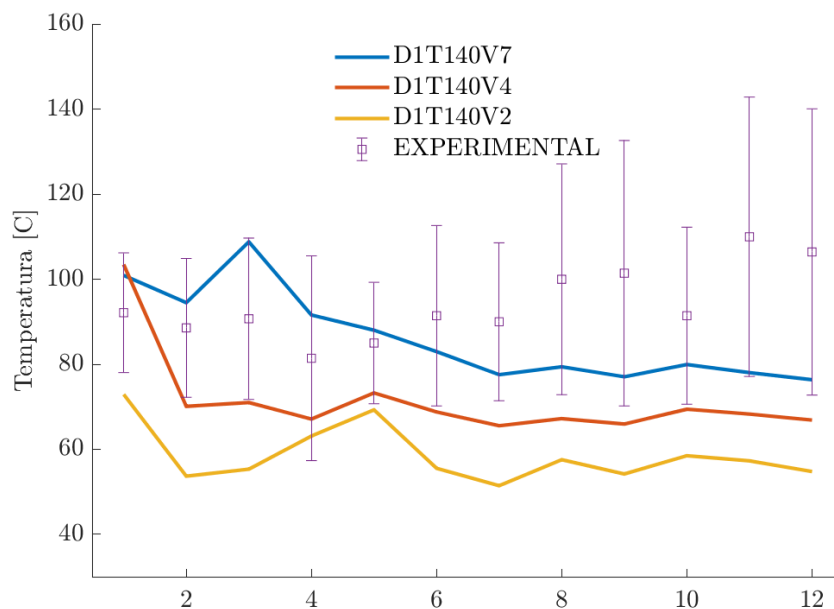
Para o presente estudo, foram selecionados três dispositivos de controle dentre os configurados nos modelos construídos. Essa escolha baseou-se em critérios estratégicos, visando

Figura 5.1 – Temperatura dos pontos de validação do modelo D1T200V7, D1T200V4 e D1T200V2 em comparação com a média experimental.



Fonte: Autor.

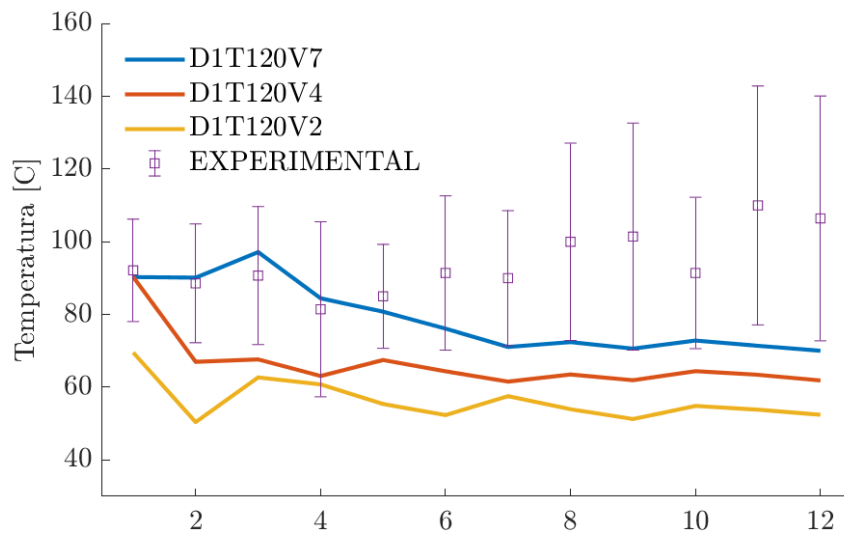
Figura 5.2 – Temperatura dos pontos de validação do modelo D1T140V7, D1T140V4 e D1T140V2 em comparação com a média experimental.



Fonte: Autor.

compreender o gradiente de temperatura do forno em diferentes pontos: próximo à entrada inferior, próximo à saída e no ponto mais distante em relação à alimentação inferior. Adicionalmente, calculou-se o valor médio de todos os dispositivos de controle posicionados na superfície com

Figura 5.3 – Temperatura dos pontos de validação do modelo D1T120V7, D1T120V4 e D1T120V2 em comparação com a média experimental.



Fonte: Autor.

orifícios do forno.

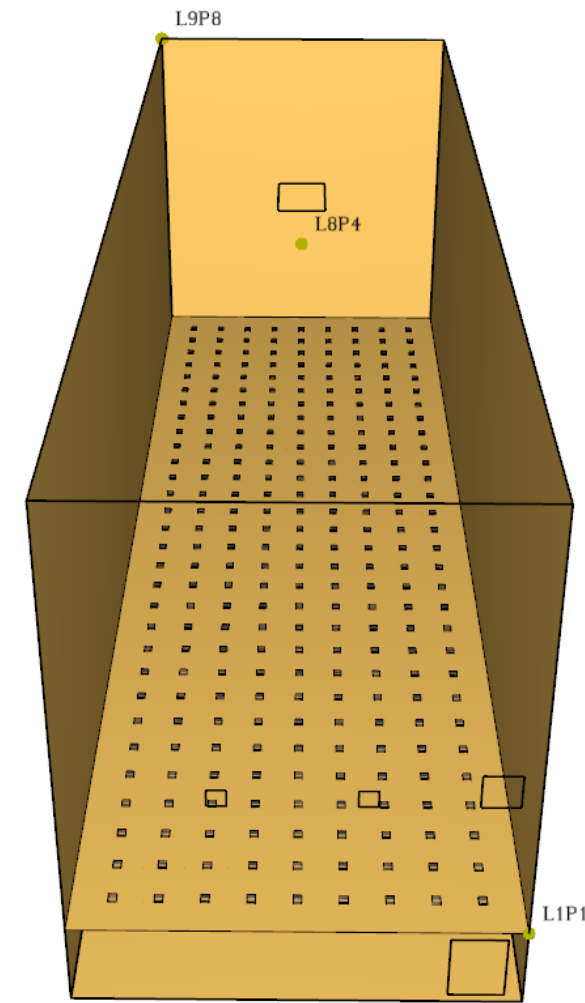
### 5.2.1 Perfil de Temperatura nos Modelos com Design 1

Os gráficos disponibilizados nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7 indicam a variação de temperatura com o tempo nos dispositivos de controle especificados respectivamente no D1T200V7 (200°C e 7 m/s), D1T200V4 (140°C e 4 m/s) e D1T200V2 (200°C e 2 m/s). Observa-se que há uma menor variação de temperatura próximo à entrada nos modelos de maior velocidade. Esse padrão se manteve consistente para todos os nove modelos que adotam o design 1.

Nos três exemplos, é evidente que cada ponto do forno manteve-se dentro de sua própria faixa de variação de temperatura, seguindo consistentemente a ordem de temperaturas decrescentes: ponto na entrada, temperatura média do chão, ponto na saída e ponto na posição mais distante em relação à alimentação do forno. No entanto, essa regularidade não foi observada em todos os modelos do design 1, pois no Modelo D1T120V7 (120°C e 7 m/s), houve momentos em que a temperatura na saída foi mais elevada do que a temperatura média do chão, conforme Figura 5.8

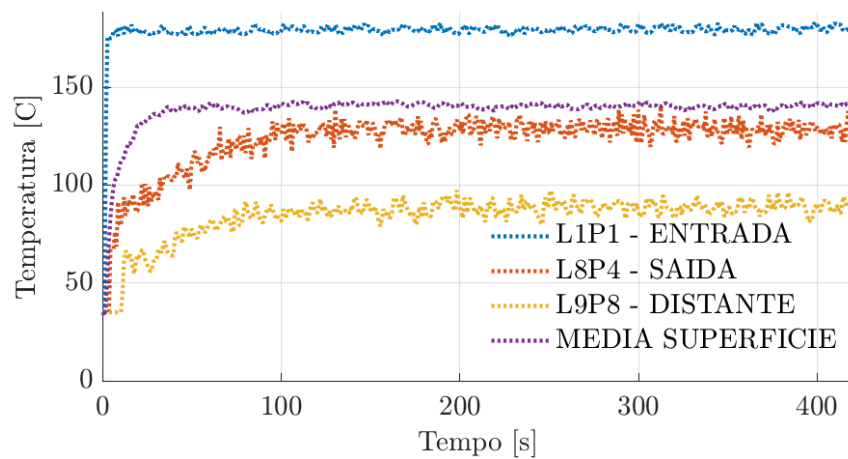
Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 é apresentado a distribuição de temperatura estimada pelo modelo numérico nas regiões internas estabelecidas pelos sistemas de monitoramento estacionário do modelo D1T200V7, D1T200V4 e D1T200V2. Conforme indicado na Figura 5.9, a linha 1 está localizada na região central da superfície com orifícios, a linha 2 está próxima à alimentação inferior, e a linha 3 está no lado oposto à linha 2. A linha 4 está posicionada no topo do forno de secagem, atravessando a abertura de saída. Todas as linhas se estendem ao longo do comprimento total do equipamento. Observa-se que em ambos os casos as maiores temperaturas se concentram nos primeiros metros da linha 2, devido à sua proximidade com a alimentação inferior. No entanto,

Figura 5.4 – Posicionamento dos dispositivos de controle dinâmicos selecionados - Visão superior.



Fonte: Autor.

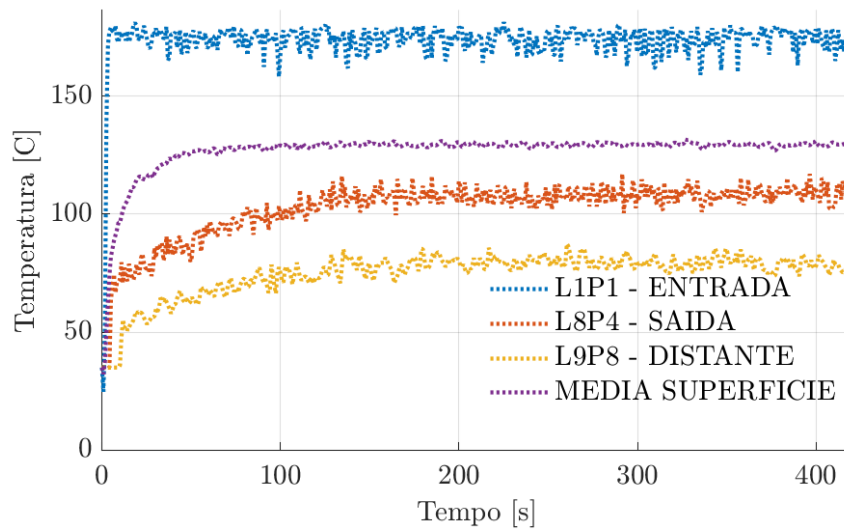
Figura 5.5 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T200V7 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8.



Fonte: Autor.

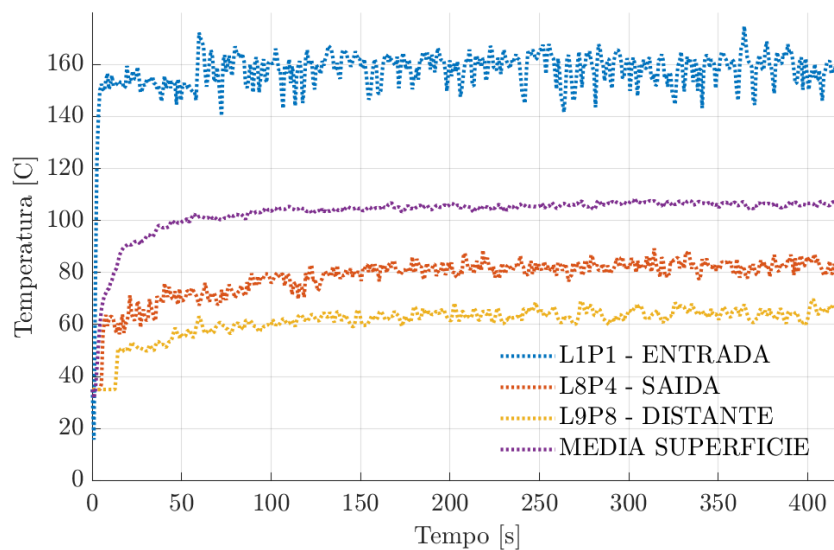


Figura 5.6 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T200V4 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8.



Fonte: Autor.

Figura 5.7 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T200V2 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8.

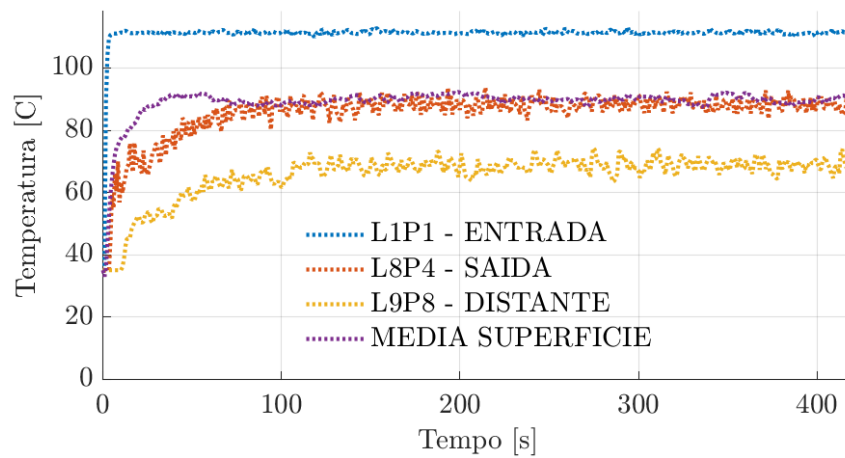


Fonte: Autor.

há uma diminuição gradual à medida que se afasta da alimentação, e isso é mais pronunciado em simulações com velocidades de alimentação mais baixas. Ao final da extensão do forno, ou seja, ao lado oposto à alimentação, há uma redução do gradiente de temperatura entre os pontos de monitoramento, indicando uma uniformidade.

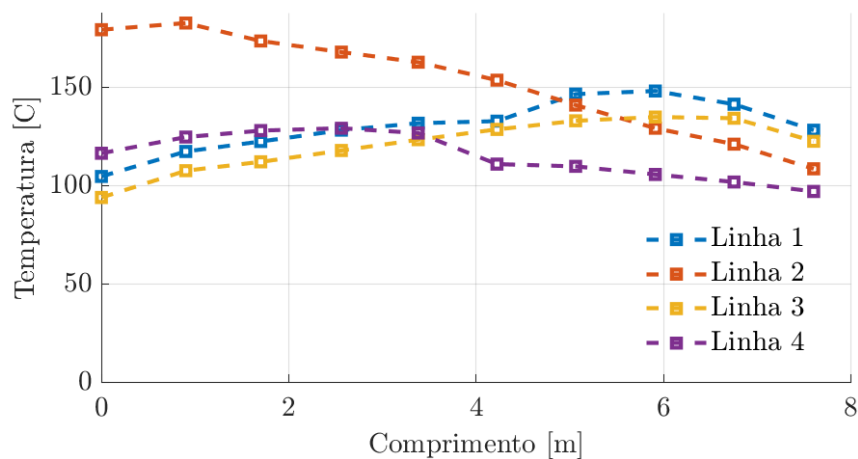
Essa maior temperatura ao longo do forno nos modelos de maior velocidade pode também ser aferida através da interface de pós-processamento disponibilizada pelo software Pyrosim, conforme figura 31, 32 e 33. Nos modelos de velocidade 7 m/s, exemplificado abaixo pelo modelo D1T200V7, há uma injeção mais intensa de ar para o interior do forno, que diminui

Figura 5.8 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D1T120V7 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8.



Fonte: Autor.

Figura 5.9 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D1T200V7.



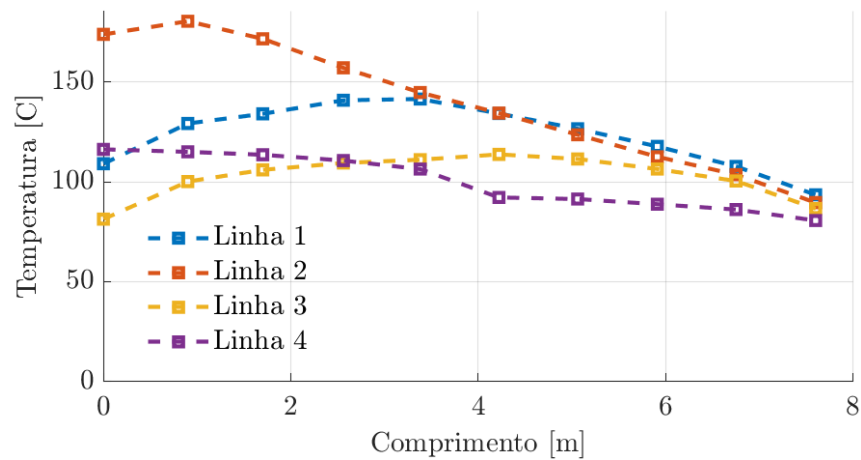
Fonte: Autor.

consideravelmente comparando-se com os outros modelos de diferentes velocidades. Quanto à alimentação acima do nível do chão, percebe-se uma propulsão mais acentuada da corrente de alimentação antes de sua ascensão. A situação oposta ocorre nos modelos com velocidade de 2 m/s, nos quais o ar sobe repentinamente e passa a arrastar-se pelo teto do forno, enquanto nos modelos com velocidade de 4 m/s observa-se um comportamento intermediário.

### 5.2.2 Perfil de Temperatura nos Modelos com Design 2

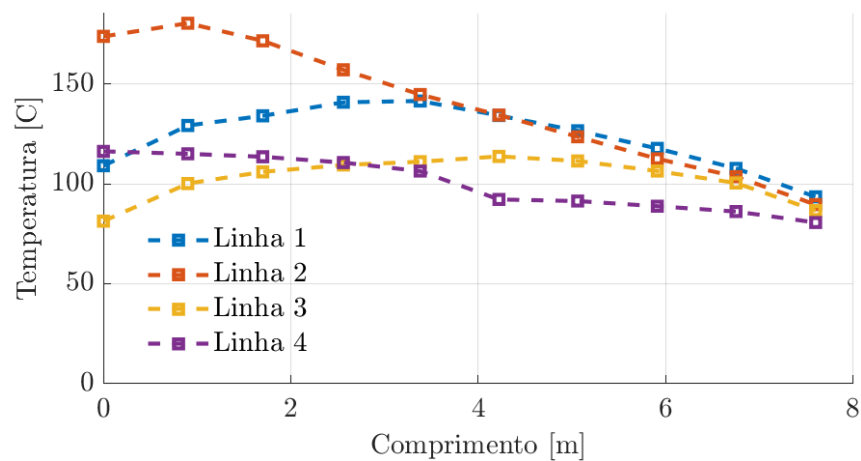
O design 2 foi concebido após análise dos resultados dos modelos do design 1, nos quais inicialmente se julgou uma influência limitada das alimentações superiores no perfil de temperatura do equipamento. No entanto, como evidenciado nas figuras 5.15, 5.16 e 5.17 (modelos do design 2), a linha de monitoramento 4, que representa a região do teto do forno, apresentou uma redução significativa em comparação com os dados do design 1. Isso contradiz a hipótese

Figura 5.10 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D1T200V4.



Fonte: Autor.

Figura 5.11 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D1T200V2.



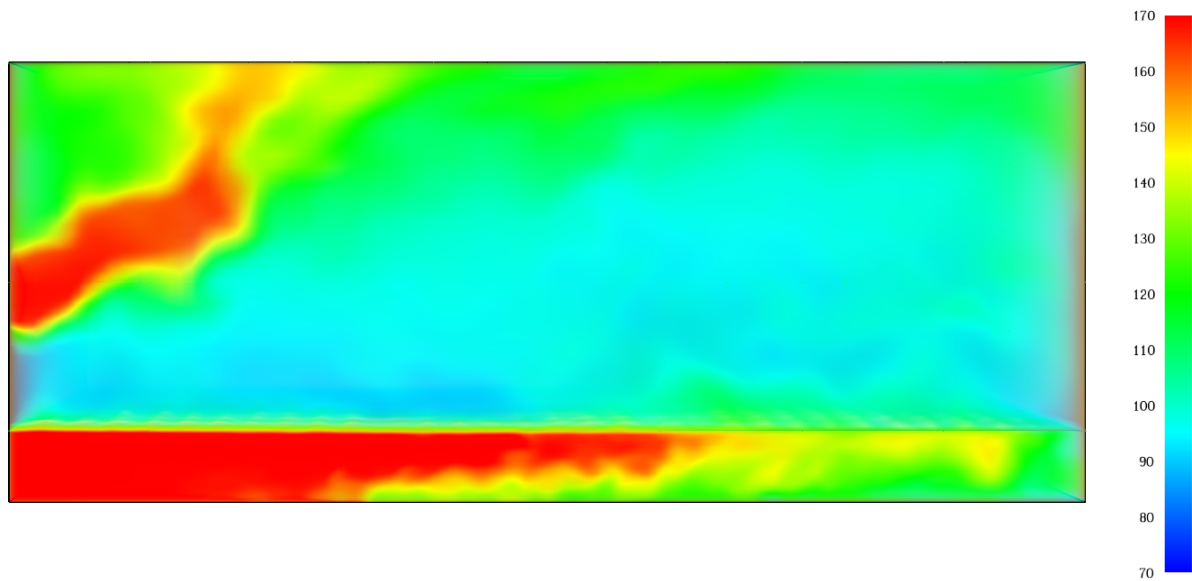
Fonte: Autor.

inicial e sugere que as alimentações superiores desempenham um papel substancial no perfil de temperatura do forno de secagem.

A figura 5.18 exemplifica a diminuição da temperatura em dois modelos, ao comparar a linha 4 localizada no teto do forno entre os diferentes designs com as demais condições iniciais idênticas. Na mesma figura, a linha 1, situada na região central da superfície com orifícios, é também comparada, revelando uma variação mínima entre os designs 1 e 2. Isso indica que, embora as alimentações superiores modifiquem o perfil de temperatura de maneira geral, não exercem uma influência direta na região onde o material a ser seco é posicionado. Para a linha 4, observou-se um desvio de 46,39% entre os dois designs, enquanto para a linha 1, o desvio foi de apenas 1,49%.

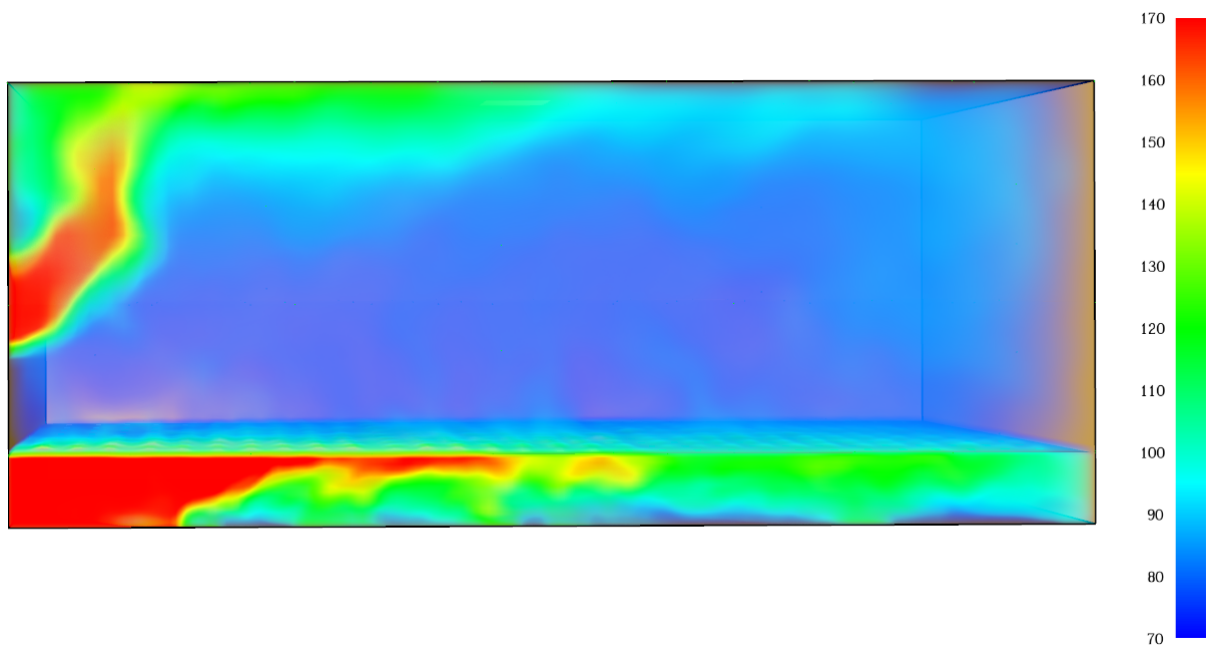
A visão lateral da distribuição de temperatura disponibilizada nos softwares de pós-processamento 5.19 permite aferir a semelhança do gradiente de temperatura da região próxima à alimentação inferior, assim como a redução da temperatura ocasionado pela eliminação da

Figura 5.12 – Visão lateral da distribuição de temperatura - D1T200V7.



Fonte: Autor.

Figura 5.13 – Visão lateral da distribuição de temperatura - D1T200V4.



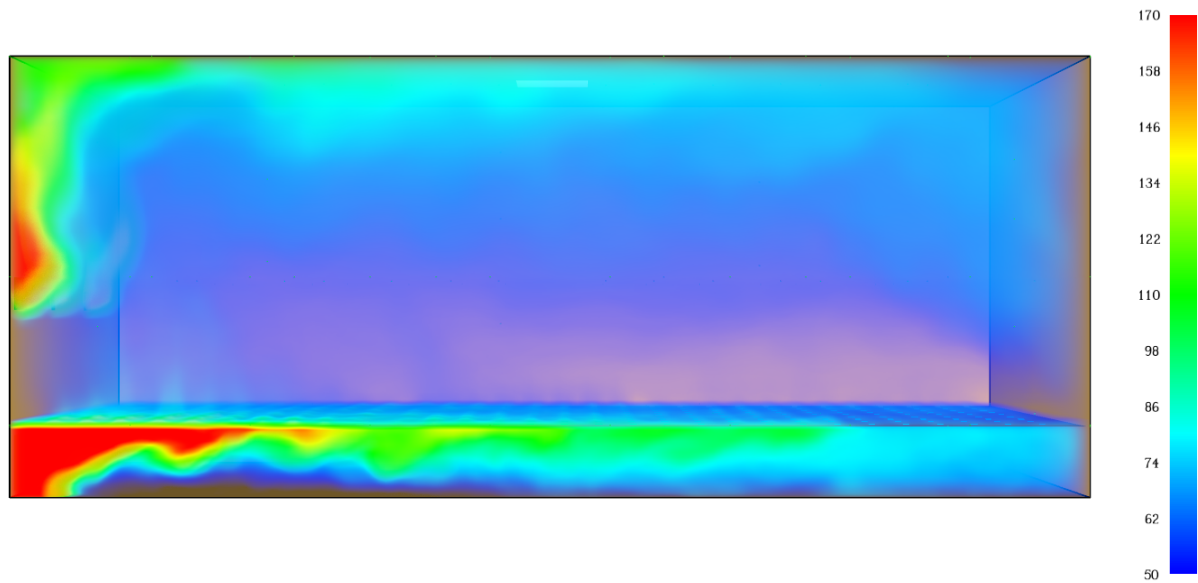
Fonte: Autor.

alimentação superior.

### 5.2.3 Perfil de Temperatura nos Modelos com Design 3

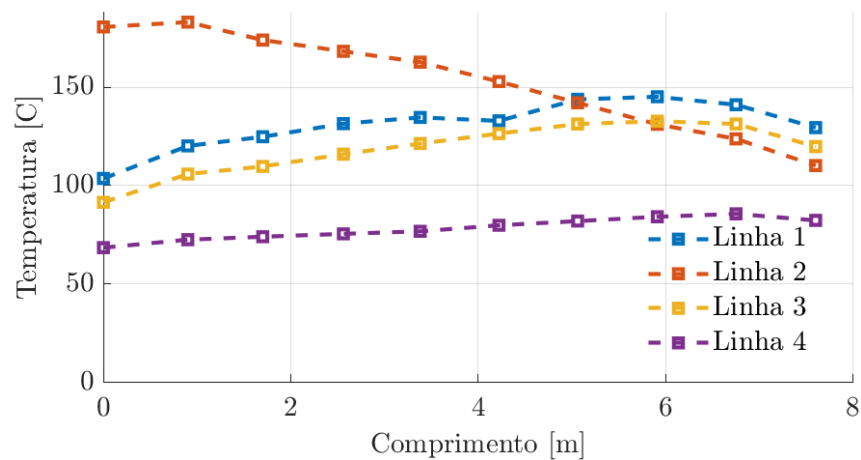
Devido à redução de temperatura no interior do forno dos modelos com design 2, decidiu-se retornar à alimentação superior presente nos modelos de design 1 durante a construção do design 3. As alterações da superfície, com redução dos números de orifícios, inserção de uma

Figura 5.14 – Visão lateral da distribuição de temperatura - D1T200V2.



Fonte: Autor.

Figura 5.15 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D2T200V7.

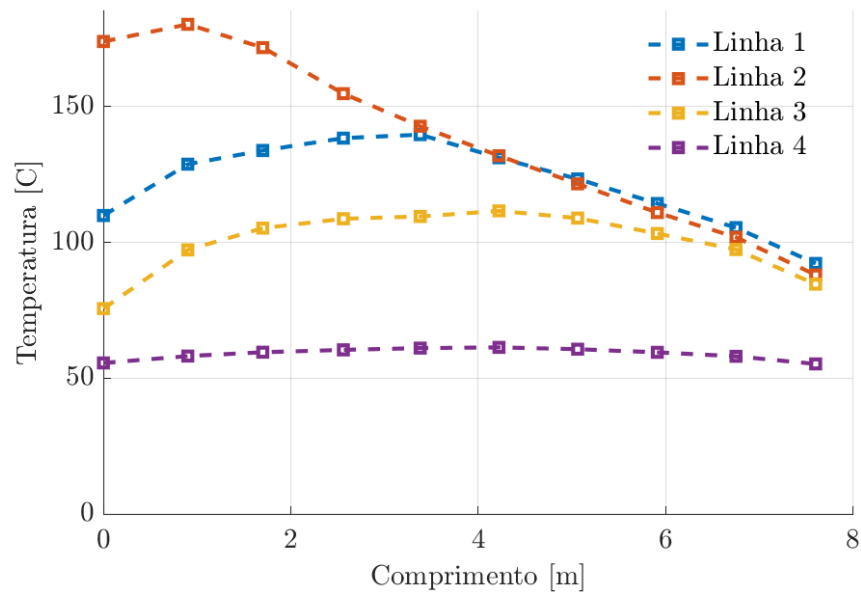


Fonte: Autor.

parede e uma maior abertura de alimentação inferior para o interior do forno, provocou uma maior uniformidade ao longo do equipamento, como pode ser visualizado na figura 5.20

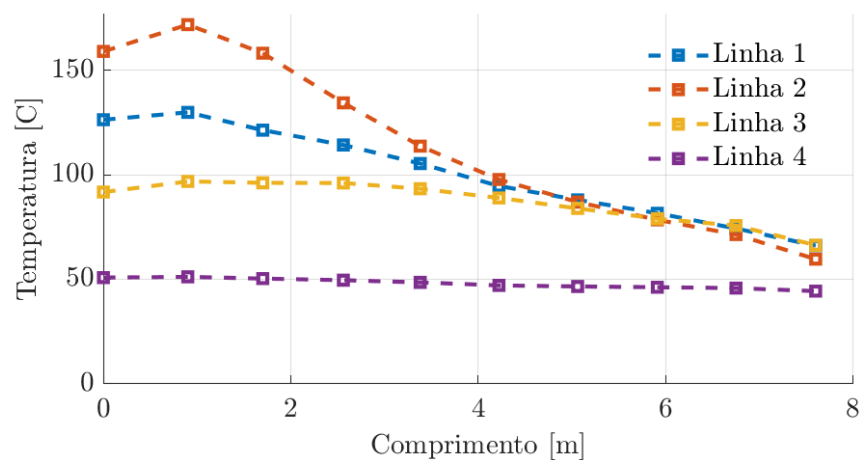
É perceptível também a diminuição abrupta de temperatura da linha 2, próxima à alimentação, ao passar à região posterior à parede inserida na região inferior. O mesmo ocorre com todas as simulações do design 3. A redução de temperatura na superfície posterior à parede acarretou uma diminuição de temperatura também em outros pontos de monitoramento, como a média da superfície ao longo do tempo, que em comparação com os modelos de designs anteriores, apresenta um valor médio de temperatura inferior (Figura 5.21). Entretanto, no ponto de monitoramento mais distante em relação à alimentação (L9P8), houve um aumento de temperatura média em comparação com os demais modelos, o que comprova também uma melhor distribuição

Figura 5.16 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D2T200V4.



Fonte: Autor.

Figura 5.17 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D2T200V2.



Fonte: Autor.

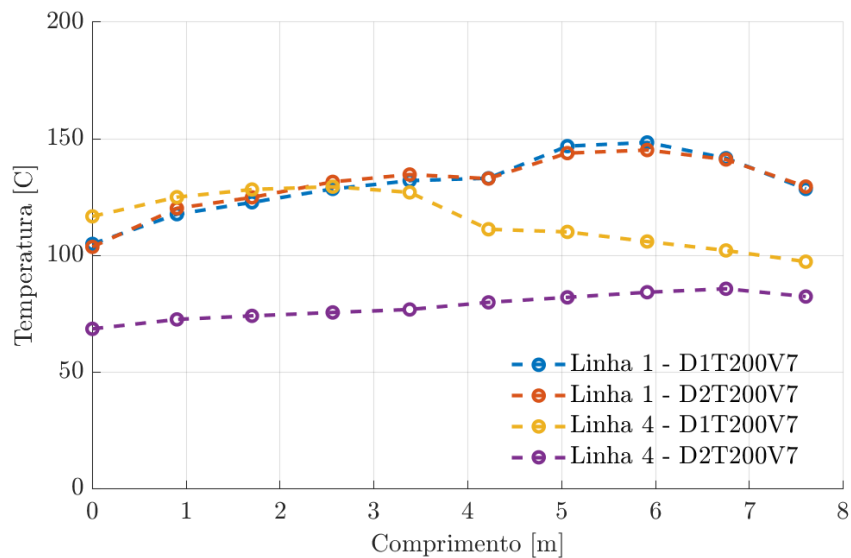
do fluxo no interior do secador.

A maior uniformidade em comparação com os modelos de designs anteriores pode ser visualizada através do sistema de monitoramento estacionário, indicado pela menor variação de temperatura entre linhas, principalmente após a região onde a parede foi posicionada, como também pode ser observado na Figura 5.22, do modelo D3T200V4.

Observou-se que a uniformidade está diretamente relacionada com o movimento da alimentação ao longo do forno.

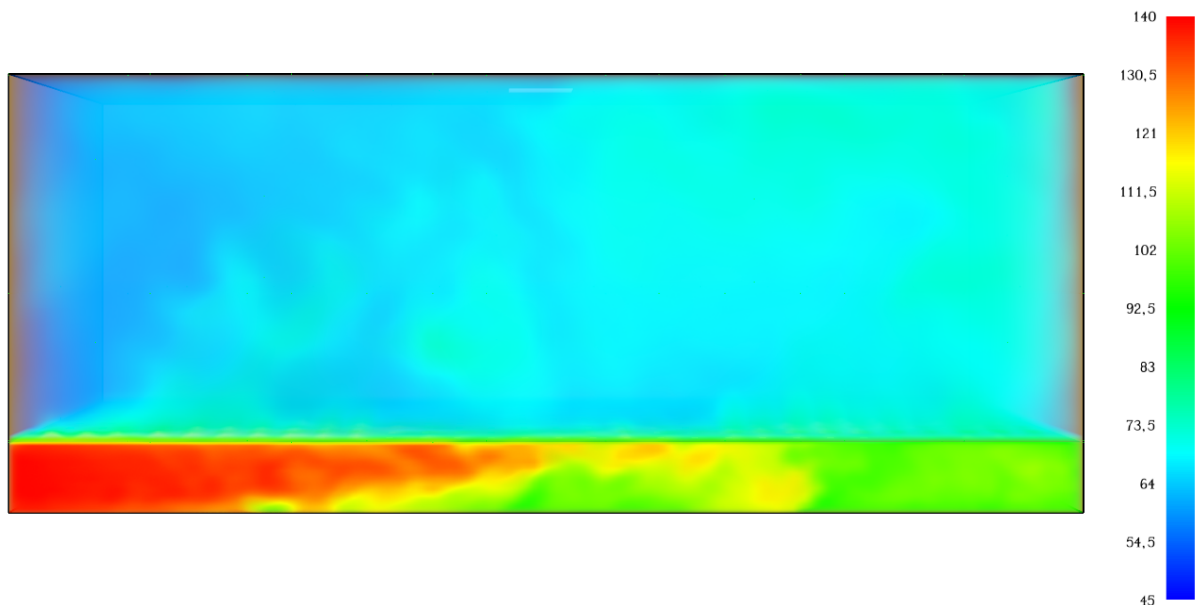
Em todos os modelos de design 1 houve uma re-circulação das correntes de ar que não fluíam em direção à saída, na qual atingiam o extremo oposto do forno, resultando na formação de um vórtice (Figura 5.23). A configuração geométrica do design 3 favoreceu esse fenômeno,

Figura 5.18 – Comparação entre distribuição de temperatura dos modelos D1T200V7 e D2T200V7 ao longo do forno.



Fonte: Autor.

Figura 5.19 – Visão lateral da distribuição de temperatura - D2T140V7

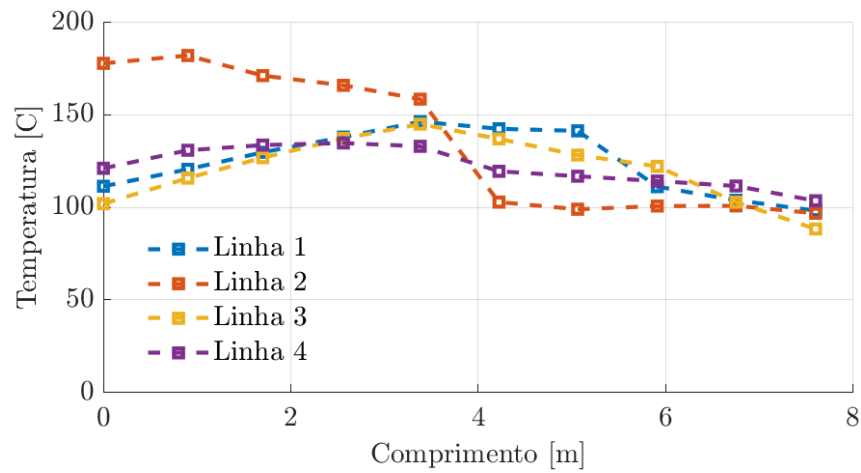


Fonte: Autor.

pois a alimentação inferior, mesmo que inicialmente dissipe-se através dos orifícios da superfície, ao alcançar a abertura inserida na própria superfície passa a incorporar-se ao vórtice, aumentando o fluxo de alimentação que percorre essa região no interior do equipamento, colaborando para a maior uniformidade.

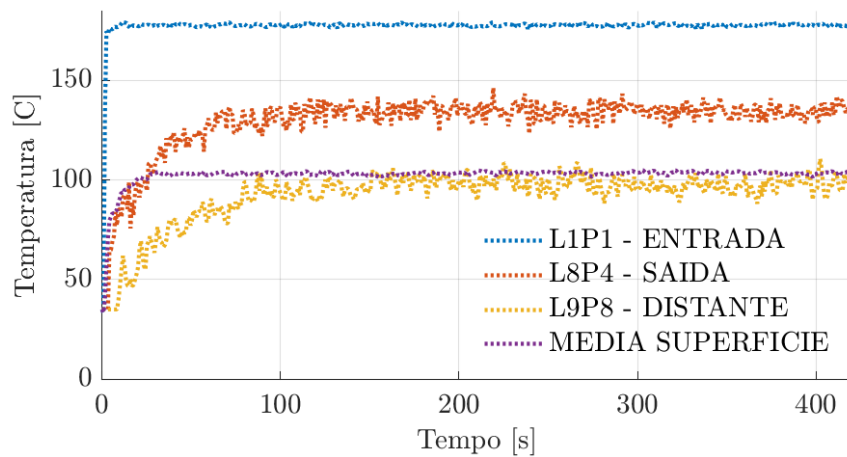
Ao analisar a diferença de temperatura em regime estacionário entre o ponto L1P1 (próximo à entrada) e o ponto L9P8 (o mais distante em relação à alimentação inferior) nas simulações de design 1 e 3, observou-se uma diminuição de 12,35% no valor médio absoluto.

Figura 5.20 – Distribuição de temperatura ao longo do forno de secagem - D3T200V7.



Fonte: Autor.

Figura 5.21 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D3T200V7 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8.

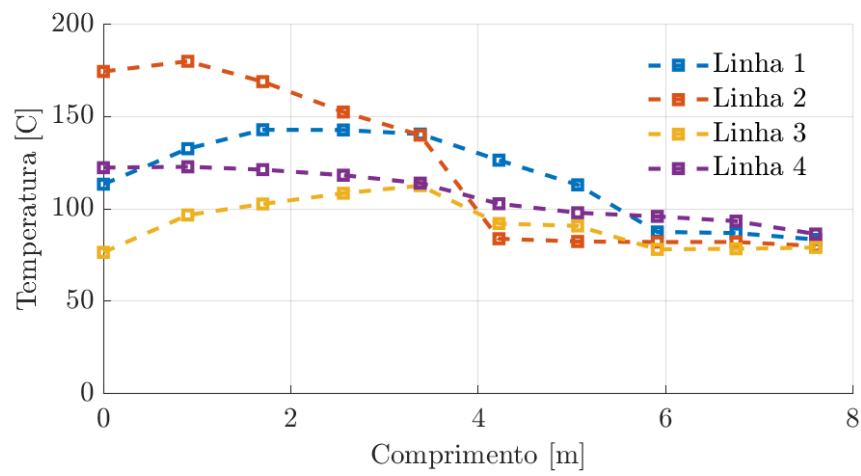


Fonte: Autor.

Esse resultado está em consonância com a uniformidade proporcionada pela recirculação.

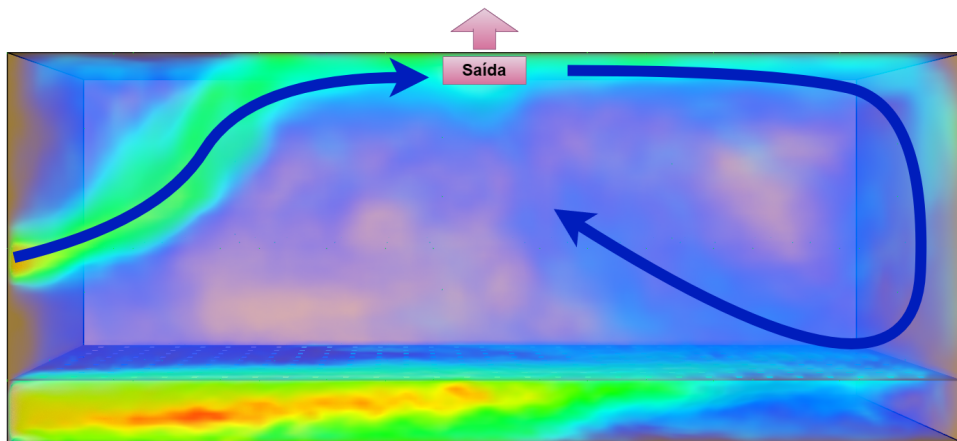


Figura 5.22 – Variação de Temperatura pelo Tempo - D3T200V4 nas localizações L1P1, L8P4, L9P8.



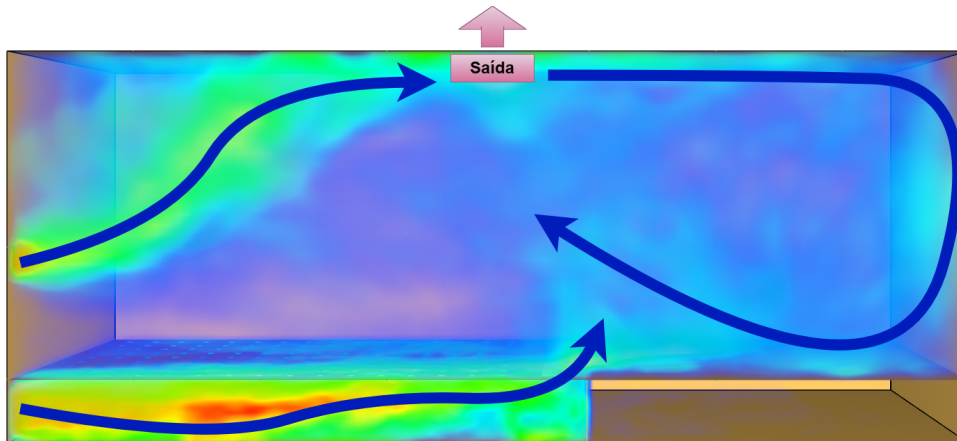
Fonte: Autor.

Figura 5.23 – Perfil de Velocidade (m/s) - D1T200V7.



Fonte: Autor.

Figura 5.24 – Perfil de Velocidade (m/s) - D3T200V7.



Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÃO

Através das ferramentas de modelagem e parametrização voltadas à fluidodinâmica computacional, foi possível avaliar o perfil de temperatura dos 27 modelos estabelecidos. Essa análise, conjugada com a comparação dos dados experimentais, permitiu posteriormente propor condições que possam promover melhor aproveitamento térmico da alimentação fornecida para o forno de secagem.

Os sistemas de monitoramento, sejam eles dinâmicos ou estacionários, desempenharam um papel crucial na coleta de dados de temperatura ao longo do forno, possibilitando não apenas registrar os valores térmicos, mas também seu comportamento temporal. Essa abordagem foi fundamental para a elaboração dos resultados obtidos.

### 6.1 DESIGN 1

O primeiro design, baseado em um forno de secagem de biomassa localizado em uma indústria têxtil em São Luís - MA, serviu de base para as nove primeiras simulações numéricas e foi utilizado para validação do método. 12 pontos de monitoramento dinâmicos posicionados em localizações aproximadas aos termopares do secador real, mostraram que as condições de contorno estabelecidas, embora meramente potenciais, adequam-se à realidade permanecendo dentro do desvio médio padrão, excetuando as simulações de baixa velocidade e temperatura ( $120^{\circ}\text{C}$  e  $2\text{ m/s}$ ), indicando que o equipamento não trabalha com condições similares. A avaliação do perfil de temperatura revelou que as alimentações superiores não se projetavam suficientemente ao interior do forno antes de ascender, gerando pouca uniformidade térmica dentro do equipamento, mesmo com um pequeno vórtice provocando uma recirculação da corrente de alimentação.

### 6.2 DESIGN 2

A remoção da alimentação superior apresentou uma diminuição do perfil de temperatura do forno de modo geral. Ao comparar os modelos dos designs 1 e 2, considerando as mesmas condições iniciais (temperatura e velocidade), observou-se uma redução expressiva de 46,39% para o segundo modelo na linha de monitoramento estacionário que percorre o teto. Contudo, na linha que atravessa a superfície de posicionamento da biomassa, próxima à alimentação inferior, não foi registrada uma variação significativa, sendo de apenas 1,49%. Isso sugere que, embora a alimentação superior contribua para a temperatura geral do forno, sua remoção pouco influencia a temperatura do local de posicionamento do material a ser secado.

### 6.3 DESIGN 3

O terceiro design demonstrou uma distribuição mais uniforme de temperaturas ao longo do forno, resultado de modificações estruturais que incluíram a introdução de uma abertura e de uma parede na região inferior. A diferença de temperatura do ponto de monitoramento mais próximo à alimentação para o mais distante sofreu uma redução em 12,35%. As alterações propiciaram a passagem da corrente para o interior do equipamento, alimentando o vórtice gerado pelo fluxo de ar proveniente das entradas superiores. Em virtude da redução de orifícios na superfície e da nova configuração implementada, o perfil de temperatura na área de posicionamento da biomassa registrou valores inferiores.

A partir das análises numéricas realizadas através da fluidodinâmica computacional é possível sintetizar que:

- A partir comparação das temperaturas nos sistemas de monitoramento do design 1 com os dados experimentais, têm-se que as análises de simulações CFD podem contribuir para visualização e compreensão de fenômenos físicos com resultados aproximados da realidade;
- As entradas de alimentação superiores influenciam no perfil de temperatura geral do forno, mas não na temperatura da região de posicionamento do material, conforme design 2.
- Os resultados utilizando o design 3 demonstraram uma distribuição mais homogênea de temperatura em pontos situados em diferentes áreas do forno, resultante da recirculação da corrente de ar. Contudo, observou-se uma diminuição na temperatura da superfície após a parede inferior.

### 6.4 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

No mesmo projeto seria possível realizar simulações alterando a natureza da alimentação para gás de combustão, avaliar outros designs com outras alimentações, outras saídas de ar ou exaustores. Quanto à validação, realizar experimentos com termopares no interior do forno possibilitaria um outro estudo de comparação com dados numéricos.

O estudo da fluidodinâmica computacional pode auxiliar o dimensionamento de vários equipamentos industriais com objetivo de visualizar seu funcionamento, otimizar a produção e reduzir custos. Outras análises numéricas através de ferramentas CFD em diferentes operações unitárias contribuiriam para essa discussão.

## REFERÊNCIAS

- ANAND, S.; MISHRA, D. P.; SARANGI, S. K. Cfd supported performance analysis of an innovative biomass dryer. *Renewable Energy*, v. 159, p. 860–872, 2020. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120309393>>.
- ANDERSON, J. *Computational Fluid Dynamics: the Basics with Applications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1996. v. 100.
- CENTRE FOR COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES. *LearnCAx*. 2006. Disponível em: <<https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/understanding-cfd-simulation-process-with-examples>>.
- COSTA, A. *SISTEMA DE SECAGEM SOLAR PARA FRUTOS TROPICAIS E MODELAGEM DA SECAGEM DE BANANA EM UM SECADOR DE COLUNA ESTÁTICA*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- GEANKOPLIS, C. *PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS*. [S.l.]: 3. ed. CECSA, 1998.
- GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, v. 24, p. 38–50, 2019. ISSN 2211-467X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300082>>.
- GOMES, H. C. *Método dos elementos finitos com fronteiras imersas aplicado a problemas de dinâmica dos fluidos e interação fluido-estrutura*. Tese (Tese de Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013. Acesso em: 2023-12-02.
- KAREKEZI, S.; LATA, K.; COELHO, S. T. Traditional biomass energy: Improving its use and moving to modern energy use. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES, BONN. [S.l.], 2004.
- LI, D. A study for development suitability of biomass power generation technology based on ghg emission reduction benefits and growth potential. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Hindawi, v. 2022, Jul 2022.
- LIRA, C. *Simulação numérica de um forno de reaquecimento*. 2007.
- MALISKA, C. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. [S.l.]: LTC Editora, 2004.
- MCDERMOTT, R. e. a. *FDS Road Map: The Road Traveled*. [S.l.], 2019.
- MCGRATTAN, e. a. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*: Nist special publication 1019. sixth edition. Gaithersburg, Maryland, USA., 2021.
- MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; MCDERMOTT, R.; VANELLA, M.; MUELLER, E. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. Sixth. Gaithersburg, Maryland, USA.: NIST Special Publication, 2023. v. 1. <<http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>>.

NOGUEIRA, R. *SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL EM CONDIÇÕES DE FLORESTA E CARBONIZAÇÃO DO RESÍDUO DO FRUTO DA CASTANHEIRA*. 2011.

NÓBREGA, E. *SECAGEM DO RESÍDUO DE ACEROLA (Malpighia emarginata DC.): ESTUDO DO PROCESSO E AVALIAÇÃO DO IMPACTO SOBRE O PRODUTO FINAL*. 2012.

OBA, R. *ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO TÚNEL*. 2011.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Synthesis report of the ipcc sixth assessment report (ar6). In: . [S.l.], 2023.

POPE, S. B. *Turbulent Flows*. New York: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9781316179475. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/9781316179475>>.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 2011. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000578>>.

STOPPE, A.; NETO, J.; SANTOS, K. Desenvolvimento de um secador solar de leito fixo: estudo experimental e simulação cfd. *Research, Society and Development*, 2020.

TREYBAL, R. *Mass-Transfer Operations*. [S.l.]: 3. ed. Nova York: Mc Graw-Hill, 1980.

## APÊNDICE A – CODIFICAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS

O software Fire Dynamics Simulator (FDS) realiza os cálculos numéricos recebendo inputs de um arquivo de texto .fds, em que é possível realizar toda a configuração de geometria, malha e condições de contorno. Utilizou-se, porém, concomitantemente ao arquivo de texto, o software Pyrosim, da empresa Thunderhead Engineering, que permite a visualização e edição dos dados disponibilizados no arquivo .fds. Embora não haja ordem obrigatória para como os comandos são escritos e executados através do arquivo .fds, recomenda-se que inicie-se com o comando &HEAD, que definirá o Character ID (sequência de 50 caracteres ou menos usada para marcar os arquivos de saída) e o título da simulação (até 250 caracteres). Em alguns editores de texto pode acontecer da última linha não ser lida pelo FDS devido à um caractere de "fim de arquivo", então, para garantir a leitura de todos os comandos finaliza-se o arquivo com &TAIL/.

Utilizando as ferramentas disponibilizadas no Pyrosim, foi possível modelar a estrutura geométrica e indicar as entradas de ar a partir do comando VENT, que é usado como ferramenta de aplicação de uma condição de contorno específica a uma área retangular, em uma superfície sólida. (Fire Dynamics Simulator User's Guide, 2023). Essas condições são especificadas através de um comando SURF\_ID, que pode fornecer configurações já padronizadas ou utilizar dados personalizados.

```
1 &VENT ID='Vent1_baixo', SURF_ID='supply', XB=-3.8,-3.8,-1.1,-0.8,-1.5,-1.1/
2 &VENT ID='Vent2_meiodir', SURF_ID='supply', XB=-3.8,-3.8,-1.1,-0.9,-0.2,0.0/
3 &VENT ID='Vent3_meiomeio', SURF_ID='supply', XB=-3.8,-3.8,-0.4,-0.3,-0.2,-0.1/
4 &VENT ID='Vent3_meioesquerda', SURF_ID='supply', XB
   =-3.8,-3.8,0.35,0.45,-0.2,-0.1/
```

Por padrão, assume-se que as condições de contorno do domínio computacional sejam as mesmas que uma parede sólida mantida à temperatura ambiente. Para especificar quaisquer propriedades, é necessário utilizar o comando SURF e inserir dados relevantes à sua aplicação.

Para o exemplo abaixo, tem-se o comando VEL que estabelece uma velocidade em m/s de algum componente, quando não é especificado, o software o define como “Ar”. Se VEL for negativo, o fluxo é direcionado para o domínio computacional, ou seja, uma abertura de suprimento. Em contrapartida, caso VEL seja positivo, o fluxo é retirado do domínio, ou seja, uma abertura de exaustão.

A temperatura em °C do fluido em questão é determinada pela configuração TMP\_FRONT, e caso não especificada, o software atribui a temperatura inicial do sistema – se porventura, a mesma não seja indicada no arquivo .fds, a temperatura será 20°C por padrão. As propriedades configuradas no exemplo abaixo dizem respeito aos modelos que utilizaram a temperatura do fluido a 140°C e velocidade de entrada a 2 m/s:

```
1 \&SURF ID='supply',
2     TMP_FRONT=140.0,
3     VEL=-2.0\
```

De forma similar foi estabelecida a saída de ar com o comando SURF\_ID = 'OPEN', que é uma configuração de fábrica para estabelecer uma região à fronteira externa do domínio computacional, ou seja, uma abertura passiva para o exterior. Por padrão, o FDS assume que a fronteira externa do domínio computacional é uma parede sólida.

```
1 \&VENT ID='Openvent', SURF_ID='OPEN', XB=-0.25,0.25,-0.15,0.15,1.55,1.55\//
```

Para a construção da superfície em que os resíduos de secagem ficam apoiados e por onde há furos que permitam a passagem de ar a partir da entrada principal, utilizou-se o comando OBST, que permite criar sólidos retangulares. Quando esses não especificados, assumem as mesmas características da superfície INERT, também pré-configurada.

```
1 \&OBST ID='ground', XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.05,-1.05\//
```

Em seguida, após a definição dessa superfície, foram incorporados orifícios, mantendo uma distância de 20 cm entre eles e aproximando suas áreas à concepção inicial por meio do comando HOLE. Esse comando subtrai a área específica da superfície em que está posicionado. Devido à necessidade de incluir 270 furos, a edição direta por meio do arquivo de texto mostrou-se mais eficiente em termos de tempo do que utilizando o Pyrosim. Isso se deve à facilidade de replicar a mesma linha, apenas ajustando as posições.

```
1 \&HOLE ID='Hole #1', XB=-3.6,-3.55,0.955,1.0,-1.06,-1.04\//
```

Para o monitoramento, a linha de comando abaixo exemplifica um dos 84 dispositivos temporais configurados, selecionando através do comando QUANTITY qual das condições devem ser monitoradas.

```
1 \&DEVC ID='L1P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,-1.2,-1.05\//
```

Assim como nos dispositivos de controle quantitativos, o comando QUANTITY configura qual a propriedade a ser mensurada, para o controle estacionário também foi solicitado TEMPORAL\_STATISTIC='RUNNING AVERAGE', que produz o valor médio ao longo do tempo e a quantidade de pontos com POINTS.

```
1 \&DEVC ID='LINE_TEMP_MID_UP_LINE RUNNING AVERAGE', QUANTITY='TEMPERATURE',  
    TEMPORAL_STATISTIC='RUNNING AVERAGE', XBP=-3.8,3.8,0.0,0.0,1.54,1.54, POINTS  
    =10\//
```

O seguinte código foi utilizado para a resolução numérica do D1T200V7 (Design 1, 200°C e 7 m/s):

```
1 Mod1_200C_7msv2.fds  
2 Generated by PyroSim - Version 2023.2.0816  
3 4 de out de 2023 01:11:19  
4  
5 &HEAD CHID='Mod1_200C_7msv2'//  
6 &TIME T_END=420.0/  
7 &DUMP DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.15, NFRAMES=500/  
8 &MISC TMPA=35.0/  
9  
10 &MESH ID='Mesh01-01', IJK=190,60,14, XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.55,-1.0/  
11 &MESH ID='Mesh01-02', IJK=95,30,13, XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.0,0.0/  
12 &MESH ID='Mesh01-03', IJK=95,30,19, XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,0.0,1.55/
```

```

13
14 &DEVC ID='TC-1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.2,-1.15,0.95/
15 &DEVC ID='TC-2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.2,-1.15,-0.35/
16 &DEVC ID='TC-3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.0,-1.15,0.69/
17 &DEVC ID='TC-4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.0,-1.15,0.11/
18 &DEVC ID='TC-5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.35,-1.15,0.88/
19 &DEVC ID='TC-6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.35,-1.15,0.41/
20 &DEVC ID='TC-7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.35,-1.15,-0.33/
21 &DEVC ID='TC-8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.48,-1.15,0.67/
22 &DEVC ID='TC-9', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.48,-1.15,0.08/
23 &DEVC ID='TC-10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.28,-1.15,0.83/
24 &DEVC ID='TC-11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.28,-1.15,0.41/
25 &DEVC ID='TC-12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.28,-1.15,-0.35/
26 &DEVC ID='L1P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,-1.2,-1.05/
27 &DEVC ID='L1P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,-1.2,-1.05/
28 &DEVC ID='L1P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,-1.2,-1.05/
29 &DEVC ID='L1P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,-1.2,-1.05/
30 &DEVC ID='L1P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,-1.2,-1.05/
31 &DEVC ID='L1P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,-1.2,-1.05/
32 &DEVC ID='L1P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,-1.2,-1.05/
33 &DEVC ID='L1P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,-1.2,-1.05/
34 &DEVC ID='L2P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,0.0,-1.05/
35 &DEVC ID='L2P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,0.0,-1.05/
36 &DEVC ID='L2P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,0.0,-1.05/
37 &DEVC ID='L2P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,0.0,-1.05/
38 &DEVC ID='L2P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,0.0,-1.05/
39 &DEVC ID='L2P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,0.0,-1.05/
40 &DEVC ID='L2P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,0.0,-1.05/
41 &DEVC ID='L2P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,0.0,-1.05/
42 &DEVC ID='L3P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,1.2,-1.05/
43 &DEVC ID='L3P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,1.2,-1.05/
44 &DEVC ID='L3P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,1.2,-1.05/
45 &DEVC ID='L3P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,1.2,-1.05/
46 &DEVC ID='L3P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,1.2,-1.05/
47 &DEVC ID='L3P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,1.2,-1.05/
48 &DEVC ID='L3P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,1.2,-1.05/
49 &DEVC ID='L3P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,1.2,-1.05/
50 &DEVC ID='L4P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,-1.2,0.0/
51 &DEVC ID='L4P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,-1.2,0.0/
52 &DEVC ID='L4P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,-1.2,0.0/
53 &DEVC ID='L4P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,-1.2,0.0/
54 &DEVC ID='L4P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,-1.2,0.0/
55 &DEVC ID='L4P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,-1.2,0.0/
56 &DEVC ID='L4P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,-1.2,0.0/
57 &DEVC ID='L4P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,-1.2,0.0/
58 &DEVC ID='L5P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,0.0,0.0/
59 &DEVC ID='L5P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,0.0,0.0/
60 &DEVC ID='L5P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,0.0,0.0/
61 &DEVC ID='L5P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,0.0,0.0/
62 &DEVC ID='L5P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,0.0,0.0/
63 &DEVC ID='L5P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,0.0,0.0/
64 &DEVC ID='L5P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,0.0,0.0/
65 &DEVC ID='L5P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,0.0,0.0/
66 &DEVC ID='L6P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,1.2,0.0/
67 &DEVC ID='L6P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,1.2,0.0/
68 &DEVC ID='L6P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,1.2,0.0/
69 &DEVC ID='L6P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,1.2,0.0/

```



```

70 &DEVC ID='L6P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,1.2,0.0/
71 &DEVC ID='L6P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,1.2,0.0/
72 &DEVC ID='L6P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,1.2,0.0/
73 &DEVC ID='L6P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,1.2,0.0/
74 &DEVC ID='L7P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,-1.2,1.55/
75 &DEVC ID='L7P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,-1.2,1.55/
76 &DEVC ID='L7P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,-1.2,1.55/
77 &DEVC ID='L7P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,-1.2,1.55/
78 &DEVC ID='L7P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,-1.2,1.55/
79 &DEVC ID='L7P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,-1.2,1.55/
80 &DEVC ID='L7P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,-1.2,1.55/
81 &DEVC ID='L7P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,-1.2,1.55/
82 &DEVC ID='L8P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,0.0,1.55/
83 &DEVC ID='L8P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,0.0,1.55/
84 &DEVC ID='L8P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,0.0,1.55/
85 &DEVC ID='L8P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,0.0,1.55/
86 &DEVC ID='L8P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,0.0,1.55/
87 &DEVC ID='L8P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,0.0,1.55/
88 &DEVC ID='L8P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,0.0,1.55/
89 &DEVC ID='L8P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,0.0,1.55/
90 &DEVC ID='L9P1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-3.8,1.2,1.55/
91 &DEVC ID='L9P2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-2.8,1.2,1.55/
92 &DEVC ID='L9P3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-1.8,1.2,1.55/
93 &DEVC ID='L9P4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=-0.8,1.2,1.55/
94 &DEVC ID='L9P5', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.8,1.2,1.55/
95 &DEVC ID='L9P6', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.8,1.2,1.55/
96 &DEVC ID='L9P7', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=2.8,1.2,1.55/
97 &DEVC ID='L9P8', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.8,1.2,1.55/
98
99 &SURF ID='supply',
100     RGB=26,204,26,
101     TMP_FRONT=200.0,
102     EMISSIVITY=1.0,
103     VEL=-7.0/
104
105 &OBST ID='ground', XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.05,-1.05/
106
107 &HOLE ID='Hole #1', XB=-3.6,-3.55,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
108 &HOLE ID='Hole #2', XB=-3.6,-3.55,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
109 &HOLE ID='Hole #3', XB=-3.6,-3.55,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
110 &HOLE ID='Hole #4', XB=-3.6,-3.55,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
111 &HOLE ID='Hole #5', XB=-3.6,-3.55,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
112 &HOLE ID='Hole #6', XB=-3.6,-3.55,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
113 &HOLE ID='Hole #7', XB=-3.6,-3.55,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
114 &HOLE ID='Hole #8', XB=-3.6,-3.55,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
115 &HOLE ID='Hole #9', XB=-3.6,-3.55,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
116 &HOLE ID='Hole #10', XB=-3.35,-3.305,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
117 &HOLE ID='Hole #11', XB=-3.35,-3.305,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
118 &HOLE ID='Hole #12', XB=-3.35,-3.305,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
119 &HOLE ID='Hole #13', XB=-3.35,-3.305,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
120 &HOLE ID='Hole #14', XB=-3.35,-3.305,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
121 &HOLE ID='Hole #15', XB=-3.35,-3.305,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
122 &HOLE ID='Hole #16', XB=-3.35,-3.305,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
123 &HOLE ID='Hole #17', XB=-3.35,-3.305,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
124 &HOLE ID='Hole #18', XB=-3.35,-3.305,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
125 &HOLE ID='Hole #19', XB=-3.105,-3.06,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
126 &HOLE ID='Hole #20', XB=-3.105,-3.06,0.71,0.755,-1.06,-1.04/

```

```

127 &HOLE ID='Hole #21', XB=-3.105,-3.06,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
128 &HOLE ID='Hole #22', XB=-3.105,-3.06,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
129 &HOLE ID='Hole #23', XB=-3.105,-3.06,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
130 &HOLE ID='Hole #24', XB=-3.105,-3.06,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
131 &HOLE ID='Hole #25', XB=-3.105,-3.06,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
132 &HOLE ID='Hole #26', XB=-3.105,-3.06,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
133 &HOLE ID='Hole #27', XB=-3.105,-3.06,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
134 &HOLE ID='Hole #28', XB=-2.86,-2.815,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
135 &HOLE ID='Hole #29', XB=-2.86,-2.815,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
136 &HOLE ID='Hole #30', XB=-2.86,-2.815,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
137 &HOLE ID='Hole #31', XB=-2.86,-2.815,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
138 &HOLE ID='Hole #32', XB=-2.86,-2.815,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
139 &HOLE ID='Hole #33', XB=-2.86,-2.815,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
140 &HOLE ID='Hole #34', XB=-2.86,-2.815,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
141 &HOLE ID='Hole #35', XB=-2.86,-2.815,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
142 &HOLE ID='Hole #36', XB=-2.86,-2.815,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
143 &HOLE ID='Hole #37', XB=-2.615,-2.57,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
144 &HOLE ID='Hole #38', XB=-2.615,-2.57,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
145 &HOLE ID='Hole #39', XB=-2.615,-2.57,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
146 &HOLE ID='Hole #40', XB=-2.615,-2.57,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
147 &HOLE ID='Hole #41', XB=-2.615,-2.57,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
148 &HOLE ID='Hole #42', XB=-2.615,-2.57,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
149 &HOLE ID='Hole #43', XB=-2.615,-2.57,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
150 &HOLE ID='Hole #44', XB=-2.615,-2.57,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
151 &HOLE ID='Hole #45', XB=-2.615,-2.57,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
152 &HOLE ID='Hole #46', XB=-2.37,-2.325,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
153 &HOLE ID='Hole #47', XB=-2.37,-2.325,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
154 &HOLE ID='Hole #48', XB=-2.37,-2.325,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
155 &HOLE ID='Hole #49', XB=-2.37,-2.325,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
156 &HOLE ID='Hole #50', XB=-2.37,-2.325,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
157 &HOLE ID='Hole #51', XB=-2.37,-2.325,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
158 &HOLE ID='Hole #52', XB=-2.37,-2.325,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
159 &HOLE ID='Hole #53', XB=-2.37,-2.325,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
160 &HOLE ID='Hole #54', XB=-2.37,-2.325,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
161 &HOLE ID='Hole #55', XB=-2.125,-2.08,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
162 &HOLE ID='Hole #56', XB=-2.125,-2.08,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
163 &HOLE ID='Hole #57', XB=-2.125,-2.08,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
164 &HOLE ID='Hole #58', XB=-2.125,-2.08,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
165 &HOLE ID='Hole #59', XB=-2.125,-2.08,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
166 &HOLE ID='Hole #60', XB=-2.125,-2.08,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
167 &HOLE ID='Hole #61', XB=-2.125,-2.08,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
168 &HOLE ID='Hole #62', XB=-2.125,-2.08,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
169 &HOLE ID='Hole #63', XB=-2.125,-2.08,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
170 &HOLE ID='Hole #64', XB=-1.88,-1.835,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
171 &HOLE ID='Hole #65', XB=-1.88,-1.835,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
172 &HOLE ID='Hole #66', XB=-1.88,-1.835,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
173 &HOLE ID='Hole #67', XB=-1.88,-1.835,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
174 &HOLE ID='Hole #68', XB=-1.88,-1.835,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
175 &HOLE ID='Hole #69', XB=-1.88,-1.835,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
176 &HOLE ID='Hole #70', XB=-1.88,-1.835,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
177 &HOLE ID='Hole #71', XB=-1.88,-1.835,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
178 &HOLE ID='Hole #72', XB=-1.88,-1.835,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
179 &HOLE ID='Hole #73', XB=-1.635,-1.59,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
180 &HOLE ID='Hole #74', XB=-1.635,-1.59,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
181 &HOLE ID='Hole #75', XB=-1.635,-1.59,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
182 &HOLE ID='Hole #76', XB=-1.635,-1.59,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
183 &HOLE ID='Hole #77', XB=-1.635,-1.59,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/

```

```

184 &HOLE ID='Hole #78', XB=-1.635,-1.59,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
185 &HOLE ID='Hole #79', XB=-1.635,-1.59,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
186 &HOLE ID='Hole #80', XB=-1.635,-1.59,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
187 &HOLE ID='Hole #81', XB=-1.635,-1.59,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
188 &HOLE ID='Hole #82', XB=-1.39,-1.345,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
189 &HOLE ID='Hole #83', XB=-1.39,-1.345,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
190 &HOLE ID='Hole #84', XB=-1.39,-1.345,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
191 &HOLE ID='Hole #85', XB=-1.39,-1.345,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
192 &HOLE ID='Hole #86', XB=-1.39,-1.345,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
193 &HOLE ID='Hole #87', XB=-1.39,-1.345,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
194 &HOLE ID='Hole #88', XB=-1.39,-1.345,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
195 &HOLE ID='Hole #89', XB=-1.39,-1.345,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
196 &HOLE ID='Hole #90', XB=-1.39,-1.345,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
197 &HOLE ID='Hole #91', XB=-1.145,-1.1,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
198 &HOLE ID='Hole #92', XB=-1.145,-1.1,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
199 &HOLE ID='Hole #93', XB=-1.145,-1.1,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
200 &HOLE ID='Hole #94', XB=-1.145,-1.1,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
201 &HOLE ID='Hole #95', XB=-1.145,-1.1,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
202 &HOLE ID='Hole #96', XB=-1.145,-1.1,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
203 &HOLE ID='Hole #97', XB=-1.145,-1.1,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
204 &HOLE ID='Hole #98', XB=-1.145,-1.1,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
205 &HOLE ID='Hole #99', XB=-1.145,-1.1,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
206 &HOLE ID='Hole #100', XB=-0.9,-0.855,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
207 &HOLE ID='Hole #101', XB=-0.9,-0.855,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
208 &HOLE ID='Hole #102', XB=-0.9,-0.855,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
209 &HOLE ID='Hole #103', XB=-0.9,-0.855,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
210 &HOLE ID='Hole #104', XB=-0.9,-0.855,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
211 &HOLE ID='Hole #105', XB=-0.9,-0.855,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
212 &HOLE ID='Hole #106', XB=-0.9,-0.855,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
213 &HOLE ID='Hole #107', XB=-0.9,-0.855,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
214 &HOLE ID='Hole #108', XB=-0.9,-0.855,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
215 &HOLE ID='Hole #109', XB=-0.655,-0.61,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
216 &HOLE ID='Hole #110', XB=-0.655,-0.61,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
217 &HOLE ID='Hole #111', XB=-0.655,-0.61,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
218 &HOLE ID='Hole #112', XB=-0.655,-0.61,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
219 &HOLE ID='Hole #113', XB=-0.655,-0.61,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
220 &HOLE ID='Hole #114', XB=-0.655,-0.61,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
221 &HOLE ID='Hole #115', XB=-0.655,-0.61,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
222 &HOLE ID='Hole #116', XB=-0.655,-0.61,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
223 &HOLE ID='Hole #117', XB=-0.655,-0.61,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
224 &HOLE ID='Hole #118', XB=-0.41,-0.365,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
225 &HOLE ID='Hole #119', XB=-0.41,-0.365,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
226 &HOLE ID='Hole #120', XB=-0.41,-0.365,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
227 &HOLE ID='Hole #121', XB=-0.41,-0.365,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
228 &HOLE ID='Hole #122', XB=-0.41,-0.365,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
229 &HOLE ID='Hole #123', XB=-0.41,-0.365,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
230 &HOLE ID='Hole #124', XB=-0.41,-0.365,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
231 &HOLE ID='Hole #125', XB=-0.41,-0.365,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
232 &HOLE ID='Hole #126', XB=-0.41,-0.365,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
233 &HOLE ID='Hole #127', XB=-0.165,-0.12,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
234 &HOLE ID='Hole #128', XB=-0.165,-0.12,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
235 &HOLE ID='Hole #129', XB=-0.165,-0.12,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
236 &HOLE ID='Hole #130', XB=-0.165,-0.12,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
237 &HOLE ID='Hole #131', XB=-0.165,-0.12,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
238 &HOLE ID='Hole #132', XB=-0.165,-0.12,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
239 &HOLE ID='Hole #133', XB=-0.165,-0.12,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
240 &HOLE ID='Hole #134', XB=-0.165,-0.12,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/

```

```

241 &HOLE ID='Hole #135', XB=-0.165,-0.12,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
242 &HOLE ID='Hole #136', XB=0.08,0.125,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
243 &HOLE ID='Hole #137', XB=0.08,0.125,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
244 &HOLE ID='Hole #138', XB=0.08,0.125,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
245 &HOLE ID='Hole #139', XB=0.08,0.125,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
246 &HOLE ID='Hole #140', XB=0.08,0.125,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
247 &HOLE ID='Hole #141', XB=0.08,0.125,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
248 &HOLE ID='Hole #142', XB=0.08,0.125,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
249 &HOLE ID='Hole #143', XB=0.08,0.125,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
250 &HOLE ID='Hole #144', XB=0.08,0.125,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
251 &HOLE ID='Hole #145', XB=0.325,0.37,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
252 &HOLE ID='Hole #146', XB=0.325,0.37,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
253 &HOLE ID='Hole #147', XB=0.325,0.37,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
254 &HOLE ID='Hole #148', XB=0.325,0.37,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
255 &HOLE ID='Hole #149', XB=0.325,0.37,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
256 &HOLE ID='Hole #150', XB=0.325,0.37,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
257 &HOLE ID='Hole #151', XB=0.325,0.37,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
258 &HOLE ID='Hole #152', XB=0.325,0.37,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
259 &HOLE ID='Hole #153', XB=0.325,0.37,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
260 &HOLE ID='Hole #154', XB=0.57,0.615,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
261 &HOLE ID='Hole #155', XB=0.57,0.615,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
262 &HOLE ID='Hole #156', XB=0.57,0.615,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
263 &HOLE ID='Hole #157', XB=0.57,0.615,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
264 &HOLE ID='Hole #158', XB=0.57,0.615,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
265 &HOLE ID='Hole #159', XB=0.57,0.615,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
266 &HOLE ID='Hole #160', XB=0.57,0.615,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
267 &HOLE ID='Hole #161', XB=0.57,0.615,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
268 &HOLE ID='Hole #162', XB=0.57,0.615,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
269 &HOLE ID='Hole #163', XB=0.815,0.86,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
270 &HOLE ID='Hole #164', XB=0.815,0.86,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
271 &HOLE ID='Hole #165', XB=0.815,0.86,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
272 &HOLE ID='Hole #166', XB=0.815,0.86,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
273 &HOLE ID='Hole #167', XB=0.815,0.86,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
274 &HOLE ID='Hole #168', XB=0.815,0.86,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
275 &HOLE ID='Hole #169', XB=0.815,0.86,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
276 &HOLE ID='Hole #170', XB=0.815,0.86,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
277 &HOLE ID='Hole #171', XB=0.815,0.86,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
278 &HOLE ID='Hole #172', XB=1.06,1.105,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
279 &HOLE ID='Hole #173', XB=1.06,1.105,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
280 &HOLE ID='Hole #174', XB=1.06,1.105,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
281 &HOLE ID='Hole #175', XB=1.06,1.105,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
282 &HOLE ID='Hole #176', XB=1.06,1.105,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
283 &HOLE ID='Hole #177', XB=1.06,1.105,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
284 &HOLE ID='Hole #178', XB=1.06,1.105,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
285 &HOLE ID='Hole #179', XB=1.06,1.105,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
286 &HOLE ID='Hole #180', XB=1.06,1.105,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
287 &HOLE ID='Hole #181', XB=1.305,1.35,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
288 &HOLE ID='Hole #182', XB=1.305,1.35,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
289 &HOLE ID='Hole #183', XB=1.305,1.35,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
290 &HOLE ID='Hole #184', XB=1.305,1.35,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
291 &HOLE ID='Hole #185', XB=1.305,1.35,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
292 &HOLE ID='Hole #186', XB=1.305,1.35,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
293 &HOLE ID='Hole #187', XB=1.305,1.35,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
294 &HOLE ID='Hole #188', XB=1.305,1.35,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
295 &HOLE ID='Hole #189', XB=1.305,1.35,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
296 &HOLE ID='Hole #190', XB=1.55,1.595,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
297 &HOLE ID='Hole #191', XB=1.55,1.595,0.71,0.755,-1.06,-1.04/

```

```

298 &HOLE ID='Hole #192', XB=1.55,1.595,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
299 &HOLE ID='Hole #193', XB=1.55,1.595,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
300 &HOLE ID='Hole #194', XB=1.55,1.595,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
301 &HOLE ID='Hole #195', XB=1.55,1.595,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
302 &HOLE ID='Hole #196', XB=1.55,1.595,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
303 &HOLE ID='Hole #197', XB=1.55,1.595,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
304 &HOLE ID='Hole #198', XB=1.55,1.595,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
305 &HOLE ID='Hole #199', XB=1.795,1.84,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
306 &HOLE ID='Hole #200', XB=1.795,1.84,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
307 &HOLE ID='Hole #201', XB=1.795,1.84,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
308 &HOLE ID='Hole #202', XB=1.795,1.84,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
309 &HOLE ID='Hole #203', XB=1.795,1.84,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
310 &HOLE ID='Hole #204', XB=1.795,1.84,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
311 &HOLE ID='Hole #205', XB=1.795,1.84,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
312 &HOLE ID='Hole #206', XB=1.795,1.84,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
313 &HOLE ID='Hole #207', XB=1.795,1.84,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
314 &HOLE ID='Hole #208', XB=2.04,2.085,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
315 &HOLE ID='Hole #209', XB=2.04,2.085,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
316 &HOLE ID='Hole #210', XB=2.04,2.085,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
317 &HOLE ID='Hole #211', XB=2.04,2.085,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
318 &HOLE ID='Hole #212', XB=2.04,2.085,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
319 &HOLE ID='Hole #213', XB=2.04,2.085,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
320 &HOLE ID='Hole #214', XB=2.04,2.085,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
321 &HOLE ID='Hole #215', XB=2.04,2.085,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
322 &HOLE ID='Hole #216', XB=2.04,2.085,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
323 &HOLE ID='Hole #217', XB=2.285,2.33,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
324 &HOLE ID='Hole #218', XB=2.285,2.33,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
325 &HOLE ID='Hole #219', XB=2.285,2.33,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
326 &HOLE ID='Hole #220', XB=2.285,2.33,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
327 &HOLE ID='Hole #221', XB=2.285,2.33,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
328 &HOLE ID='Hole #222', XB=2.285,2.33,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
329 &HOLE ID='Hole #223', XB=2.285,2.33,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
330 &HOLE ID='Hole #224', XB=2.285,2.33,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
331 &HOLE ID='Hole #225', XB=2.285,2.33,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
332 &HOLE ID='Hole #226', XB=2.53,2.575,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
333 &HOLE ID='Hole #227', XB=2.53,2.575,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
334 &HOLE ID='Hole #228', XB=2.53,2.575,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
335 &HOLE ID='Hole #229', XB=2.53,2.575,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
336 &HOLE ID='Hole #230', XB=2.53,2.575,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
337 &HOLE ID='Hole #231', XB=2.53,2.575,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
338 &HOLE ID='Hole #232', XB=2.53,2.575,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
339 &HOLE ID='Hole #233', XB=2.53,2.575,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
340 &HOLE ID='Hole #234', XB=2.53,2.575,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
341 &HOLE ID='Hole #235', XB=2.775,2.82,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
342 &HOLE ID='Hole #236', XB=2.775,2.82,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
343 &HOLE ID='Hole #237', XB=2.775,2.82,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
344 &HOLE ID='Hole #238', XB=2.775,2.82,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
345 &HOLE ID='Hole #239', XB=2.775,2.82,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
346 &HOLE ID='Hole #240', XB=2.775,2.82,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
347 &HOLE ID='Hole #241', XB=2.775,2.82,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
348 &HOLE ID='Hole #242', XB=2.775,2.82,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
349 &HOLE ID='Hole #243', XB=2.775,2.82,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
350 &HOLE ID='Hole #244', XB=3.02,3.065,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
351 &HOLE ID='Hole #245', XB=3.02,3.065,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
352 &HOLE ID='Hole #246', XB=3.02,3.065,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
353 &HOLE ID='Hole #247', XB=3.02,3.065,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
354 &HOLE ID='Hole #248', XB=3.02,3.065,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/

```



```

355 &HOLE ID='Hole #249', XB=3.02,3.065,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
356 &HOLE ID='Hole #250', XB=3.02,3.065,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
357 &HOLE ID='Hole #251', XB=3.02,3.065,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
358 &HOLE ID='Hole #252', XB=3.02,3.065,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
359 &HOLE ID='Hole #253', XB=3.265,3.31,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
360 &HOLE ID='Hole #254', XB=3.265,3.31,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
361 &HOLE ID='Hole #255', XB=3.265,3.31,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
362 &HOLE ID='Hole #256', XB=3.265,3.31,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
363 &HOLE ID='Hole #257', XB=3.265,3.31,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
364 &HOLE ID='Hole #258', XB=3.265,3.31,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
365 &HOLE ID='Hole #259', XB=3.265,3.31,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
366 &HOLE ID='Hole #260', XB=3.265,3.31,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
367 &HOLE ID='Hole #261', XB=3.265,3.31,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
368 &HOLE ID='Hole #262', XB=3.51,3.555,0.955,1.0,-1.06,-1.04/
369 &HOLE ID='Hole #263', XB=3.51,3.555,0.71,0.755,-1.06,-1.04/
370 &HOLE ID='Hole #264', XB=3.51,3.555,0.465,0.51,-1.06,-1.04/
371 &HOLE ID='Hole #265', XB=3.51,3.555,0.22,0.265,-1.06,-1.04/
372 &HOLE ID='Hole #266', XB=3.51,3.555,-0.025,0.02,-1.06,-1.04/
373 &HOLE ID='Hole #267', XB=3.51,3.555,-0.27,-0.225,-1.06,-1.04/
374 &HOLE ID='Hole #268', XB=3.51,3.555,-0.515,-0.47,-1.06,-1.04/
375 &HOLE ID='Hole #269', XB=3.51,3.555,-0.76,-0.715,-1.06,-1.04/
376 &HOLE ID='Hole #270', XB=3.51,3.555,-1.005,-0.96,-1.06,-1.04/
377
378 &VENT ID='Vent1_baixo', SURF_ID='supply', XB=-3.8,-3.8,-1.1,-0.8,-1.5,-1.1/
379 &VENT ID='Vent2_meiodir', SURF_ID='supply', XB=-3.8,-3.8,-1.1,-0.9,-0.2,0.0/
380 &VENT ID='Vent3_meiomeio', SURF_ID='supply', XB=-3.8,-3.8,-0.4,-0.3,-0.2,-0.1/
381 &VENT ID='Vent3_meioesquerda', SURF_ID='supply', XB
    =-3.8,-3.8,0.35,0.45,-0.2,-0.1/
382 &VENT ID='Openvent', SURF_ID='OPEN', XB=-0.25,0.25,-0.15,0.15,1.55,1.55/
383
384 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='SLICETEM Y = 0', PBX=0.0/
385 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='SLICEVEL Y = 0', PBX=0.0/
386 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='SLICETEM Y = 1', PBX=1.0/
387 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='SLICETEM Y = -1', PBX=-1.0/
388 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='SLICEVEL Y = 1', PBX=1.0/
389 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='SLICEVEL Y = -1', PBX=-1.0/
390 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='SLICEGROUND', PBZ=-1.05/
391 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='SLICETEMPCONTROLWALL', PBX=-1.19/
392 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='SLICEUNDERGROUND', PBZ=-1.54/
393 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='temperatura', XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.55,1.55/
394 &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., ID='velocidade', XB
    =-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.55,1.55/
395
396
397 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_LOW_LINE TIME AVERAGE_LINE TIME AVERAGE', QUANTITY='
    TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='TIME AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,0.0,0.0,-1.04,-1.04, POINTS=10/
398 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_LOW_LINE RUNNING AVERAGE_LINE RUNNING AVERAGE', QUANTITY
    ='TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='RUNNING AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,0.0,0.0,-1.04,-1.04, POINTS=10/
399 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_LOW_LINE INSTANT VALUE_LINE INSTANT VALUE', QUANTITY='
    TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='INSTANT VALUE', XBP
    =-3.8,3.8,0.0,0.0,-1.04,-1.04, POINTS=10/
400 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_LOW_STEADY STATE', QUANTITY='TEMPERATURE', XBP
    =-3.8,3.8,0.0,0.0,-1.04,-1.04, POINTS=10/
401 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_UP_LINE TIME AVERAGE_LINE TIME AVERAGE', QUANTITY='
    TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='TIME AVERAGE', XBP

```

```

    =-3.8,3.8,0.0,0.0,1.54,1.54, POINTS=10/
402 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_UP_LINE RUNNING AVERAGE_LINE RUNNING AVERAGE', QUANTITY
    ='TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='RUNNING AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,0.0,0.0,1.54,1.54, POINTS=10/
403 &DEVC ID='LINE_TEMP_MID_UP_STEADY STATE', QUANTITY='TEMPERATURE', XBP
    =-3.8,3.8,0.0,0.0,1.54,1.54, POINTS=10/
404 &DEVC ID='LINE_TEMP_RGT_LOW_LINE TIME AVERAGE_LINE TIME AVERAGE', QUANTITY='
    TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='TIME AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,-1.2,-1.2,-1.04,-1.04, POINTS=10/
405 &DEVC ID='LINE_TEMP_RGT_LOW_LINE RUNNING AVERAGE_LINE RUNNING AVERAGE', QUANTITY
    ='TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='RUNNING AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,-1.2,-1.2,-1.04,-1.04, POINTS=10/
406 &DEVC ID='LINE_TEMP_RGT_LOW_STEADY STATE', QUANTITY='TEMPERATURE', XBP
    =-3.8,3.8,-1.2,-1.2,-1.04,-1.04, POINTS=10/
407 &DEVC ID='LINE_TEMP_LFT_LOW_LINE TIME AVERAGE_LINE TIME AVERAGE', QUANTITY='
    TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='TIME AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,1.2,1.2,-1.04,-1.04, POINTS=10/
408 &DEVC ID='LINE_TEMP_LFT_LOW_LINE RUNNING AVERAGE_LINE RUNNING AVERAGE', QUANTITY
    ='TEMPERATURE', TEMPORAL_STATISTIC='RUNNING AVERAGE', XBP
    =-3.8,3.8,1.2,1.2,-1.04,-1.04, POINTS=10/
409 &DEVC ID='LINE_TEMP_LFT_LOW_STEADY STATE', QUANTITY='TEMPERATURE', XBP
    =-3.8,3.8,1.2,1.2,-1.04,-1.04, POINTS=10/
410 &DEVC ID='slice ground_MEAN', QUANTITY='TEMPERATURE', SPATIAL_STATISTIC='MEAN',
    XB=-3.8,3.8,-1.2,1.2,-1.05,-1.05/
411
412
413 &TAIL /

```

## APÊNDICE B – PERFIS DE TEMPERATURA

Figura B.1 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T200V7 e D1T200V4

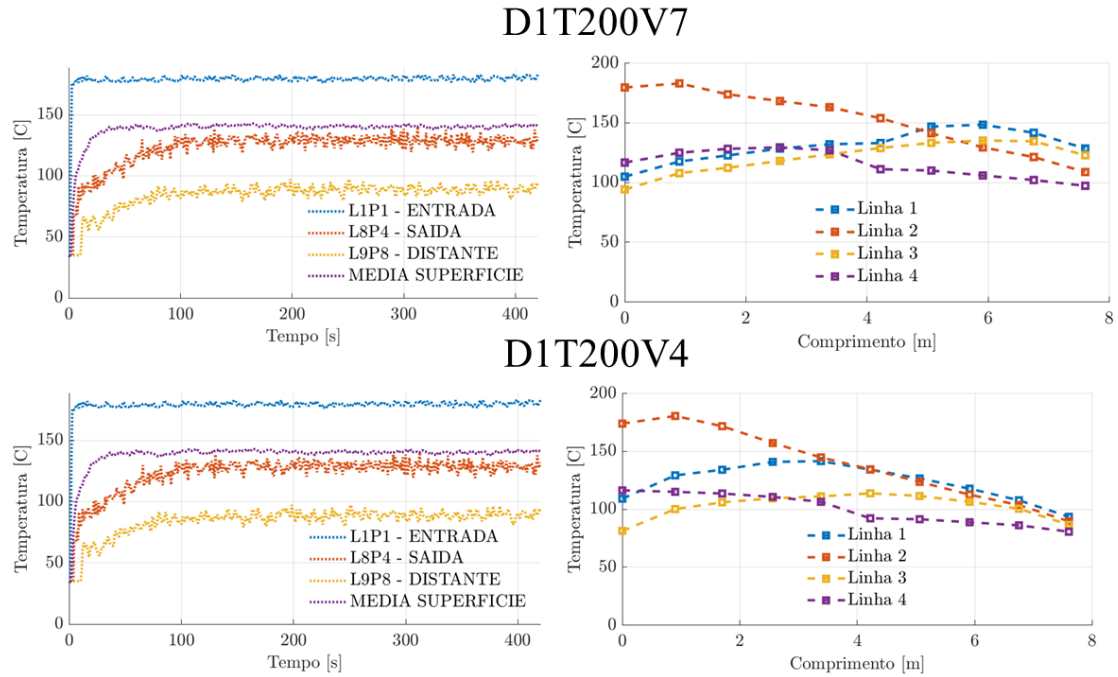


Figura B.2 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T200V2 e D1T140V7

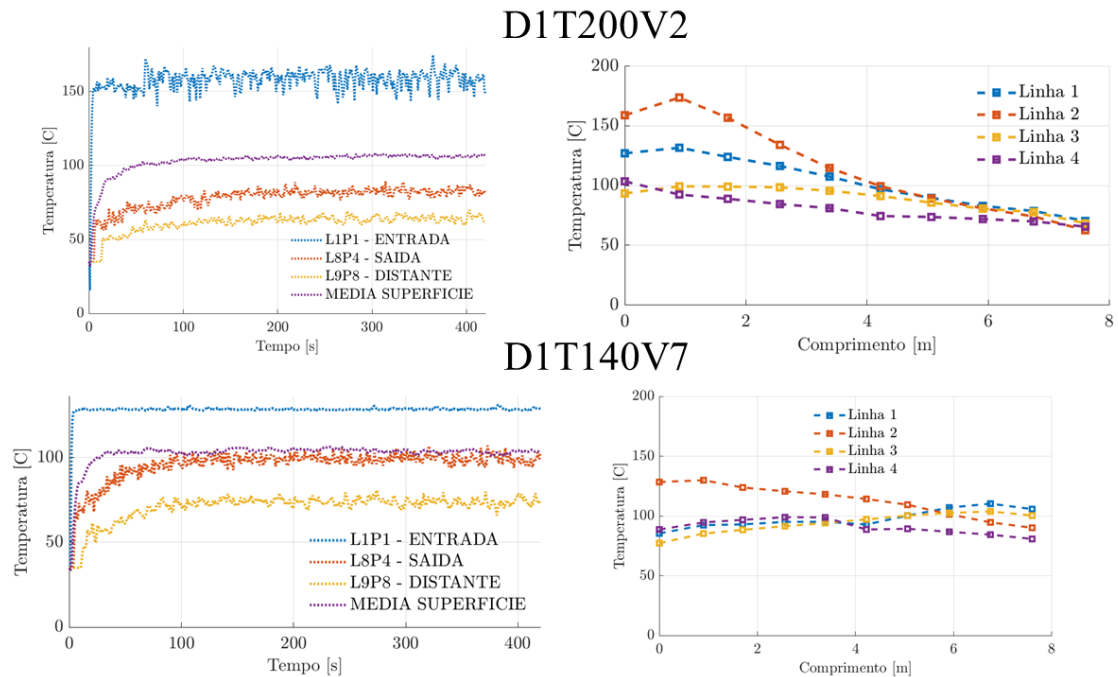




Figura B.3 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T140V4 e D1T140V2

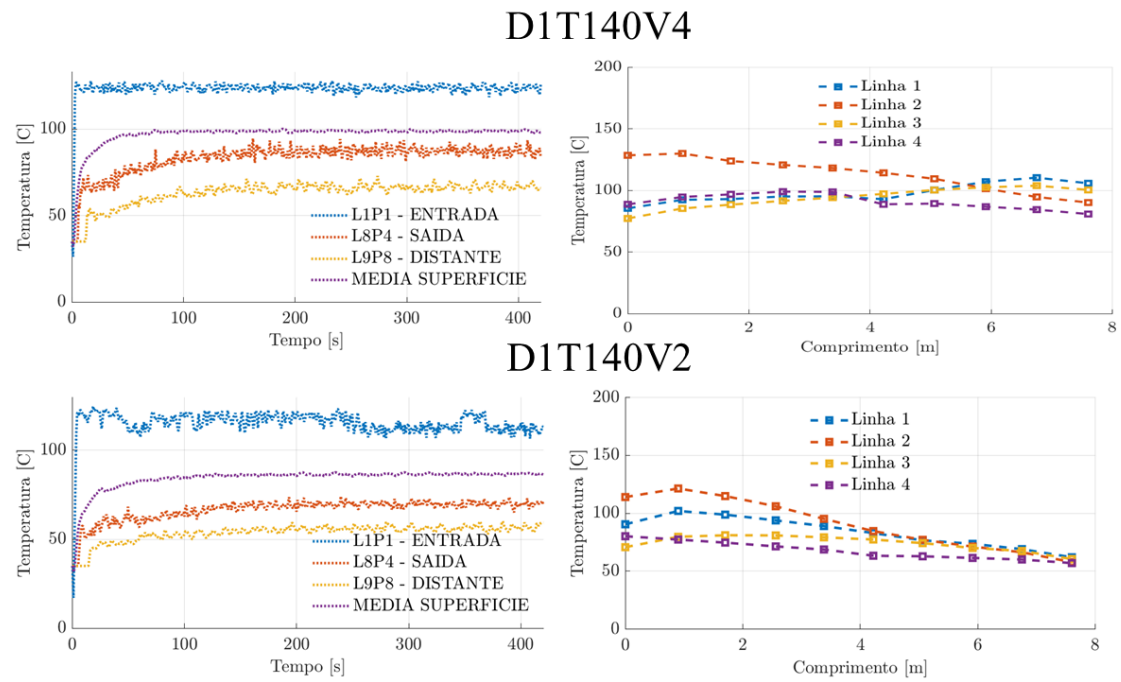


Figura B.4 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T120V7 e D1T120V4

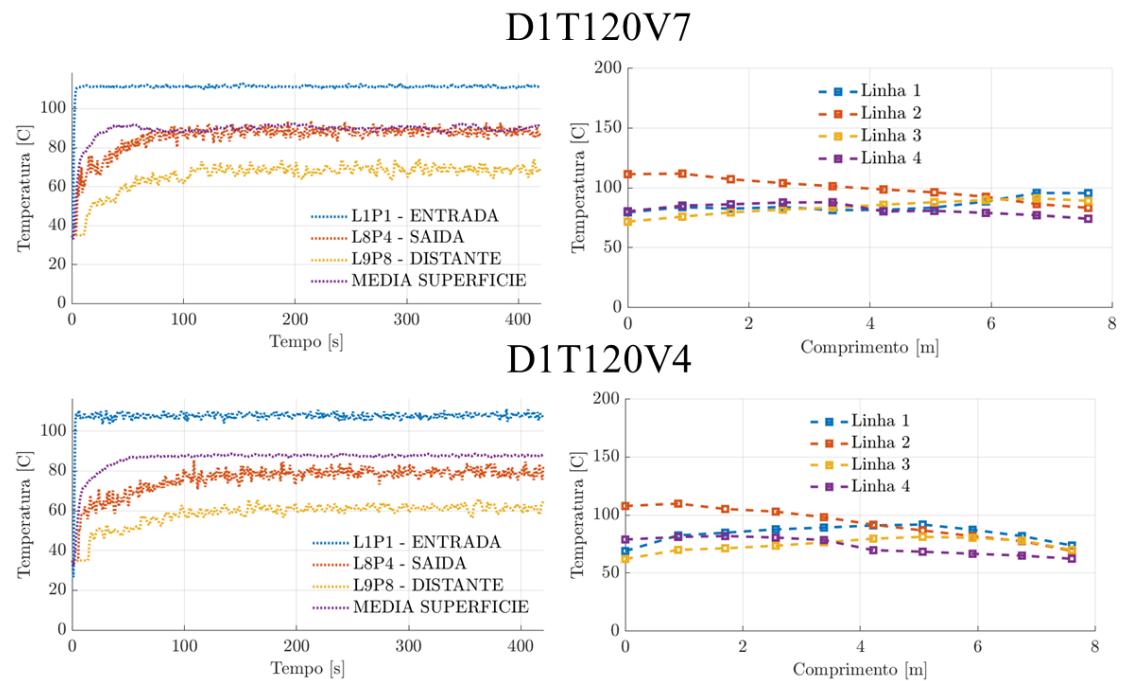


Figura B.5 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D1T120V2 e D2T200V7

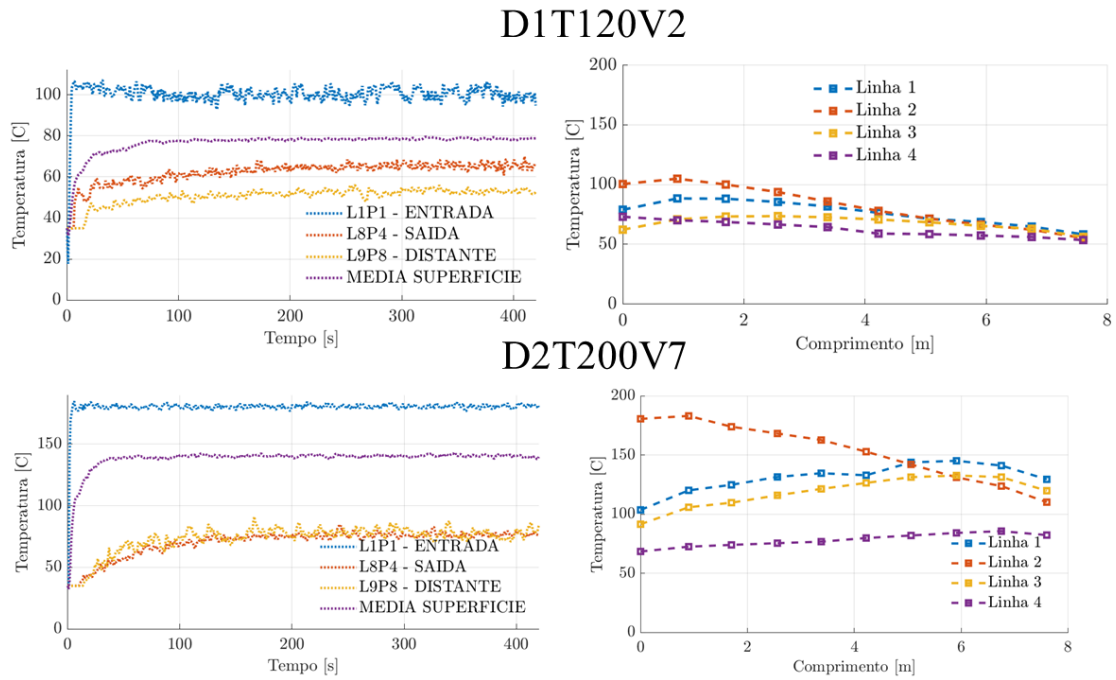


Figura B.6 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T200V4 e D2T200V2

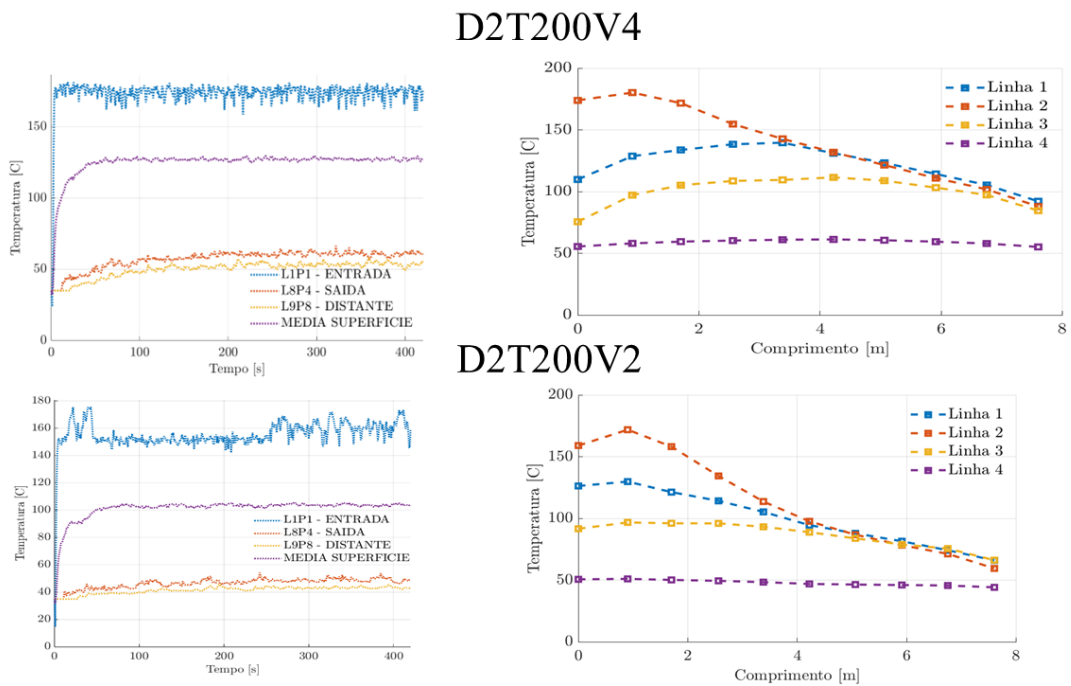


Figura B.7 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T140V7 e D2T140V4

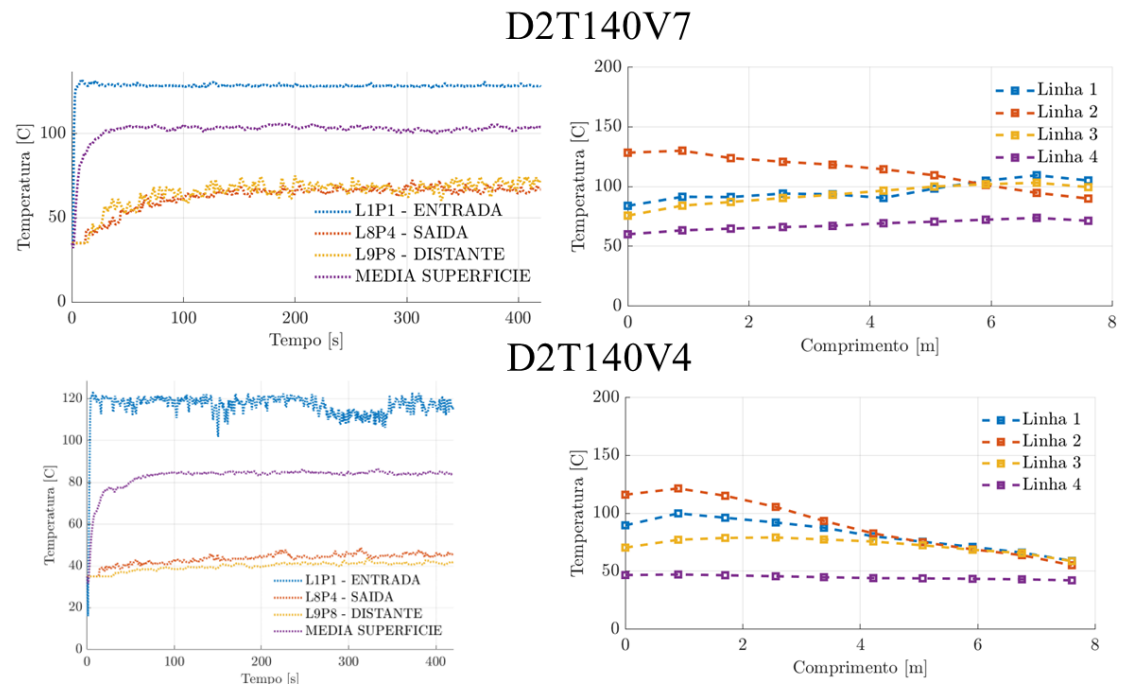


Figura B.8 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T140V2 e D2T120V7

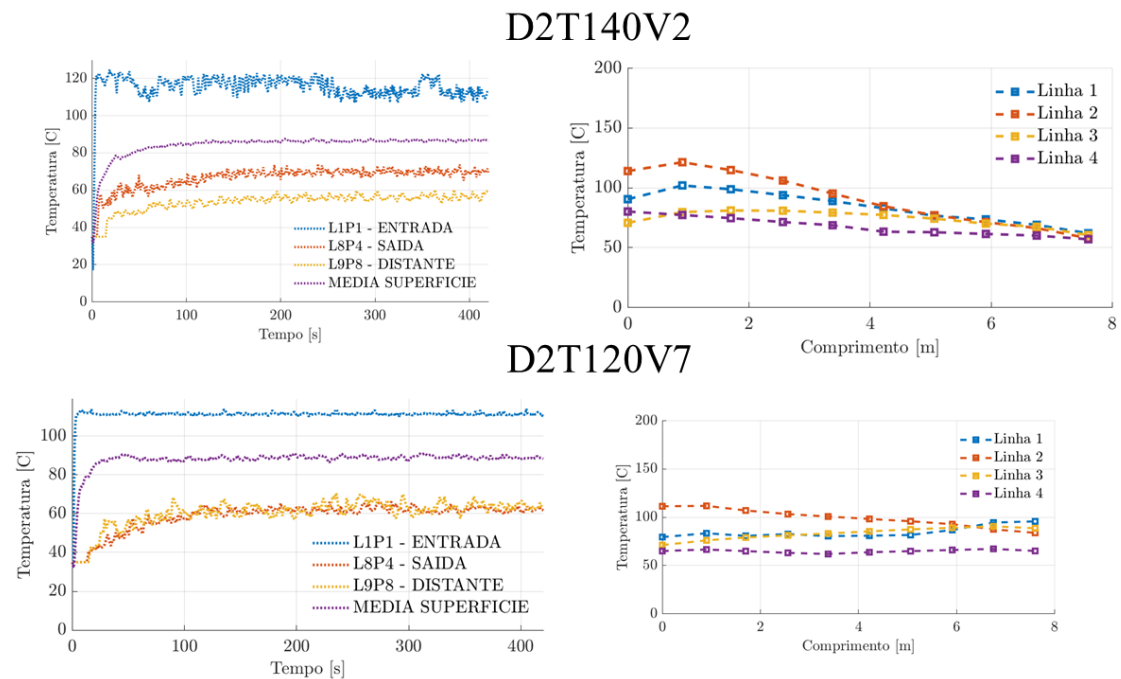
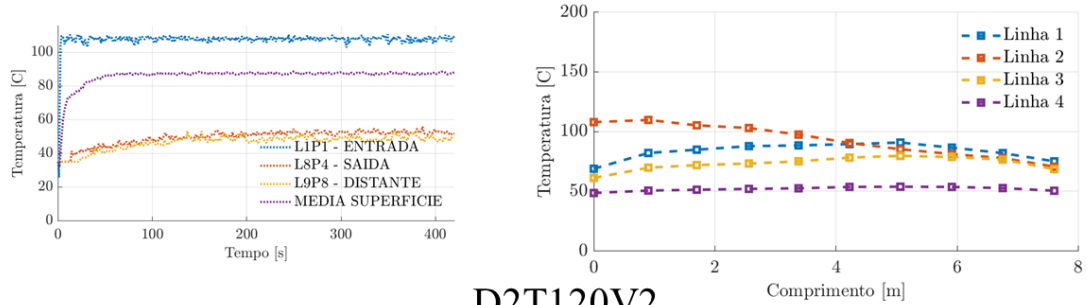


Figura B.9 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D2T120V4 e D2T120V2

### D2T120V4



### D2T120V2

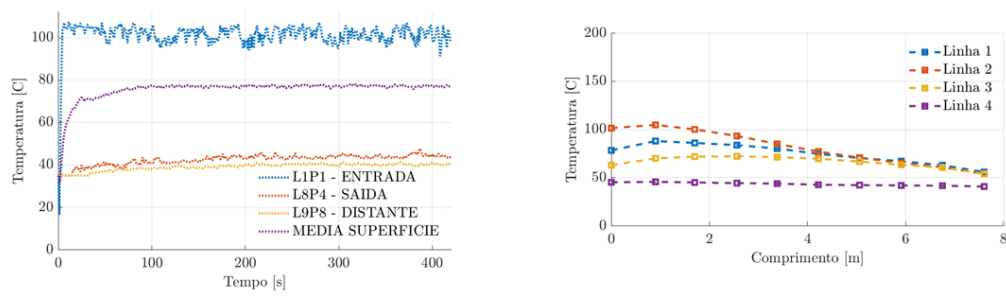
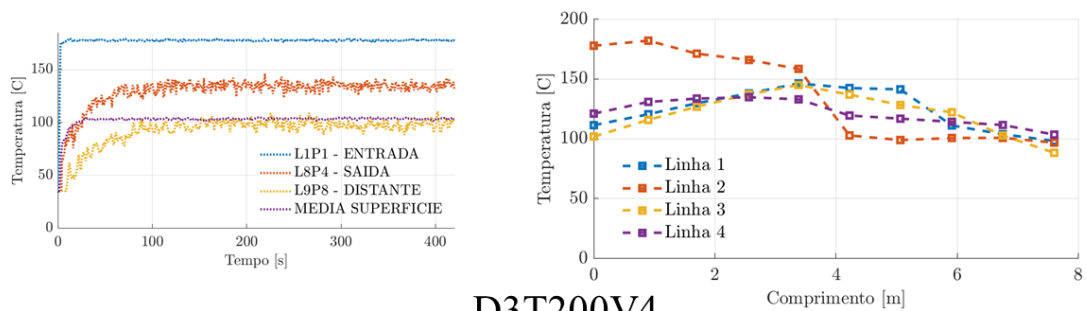


Figura B.10 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V7 e D3T200V4

### D3T200V7



### D3T200V4

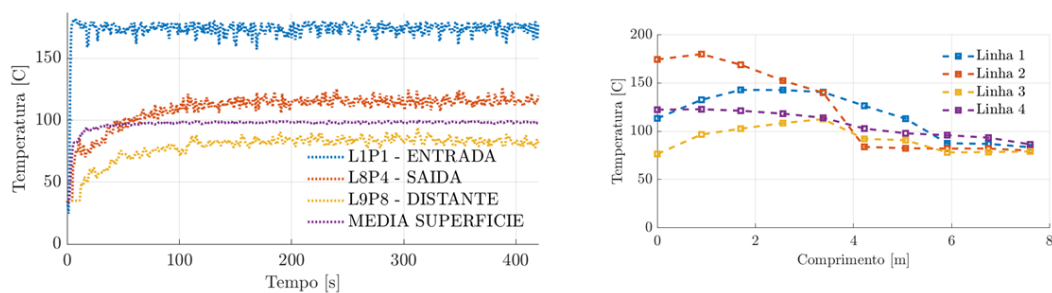


Figura B.11 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V2 e D3T140V7

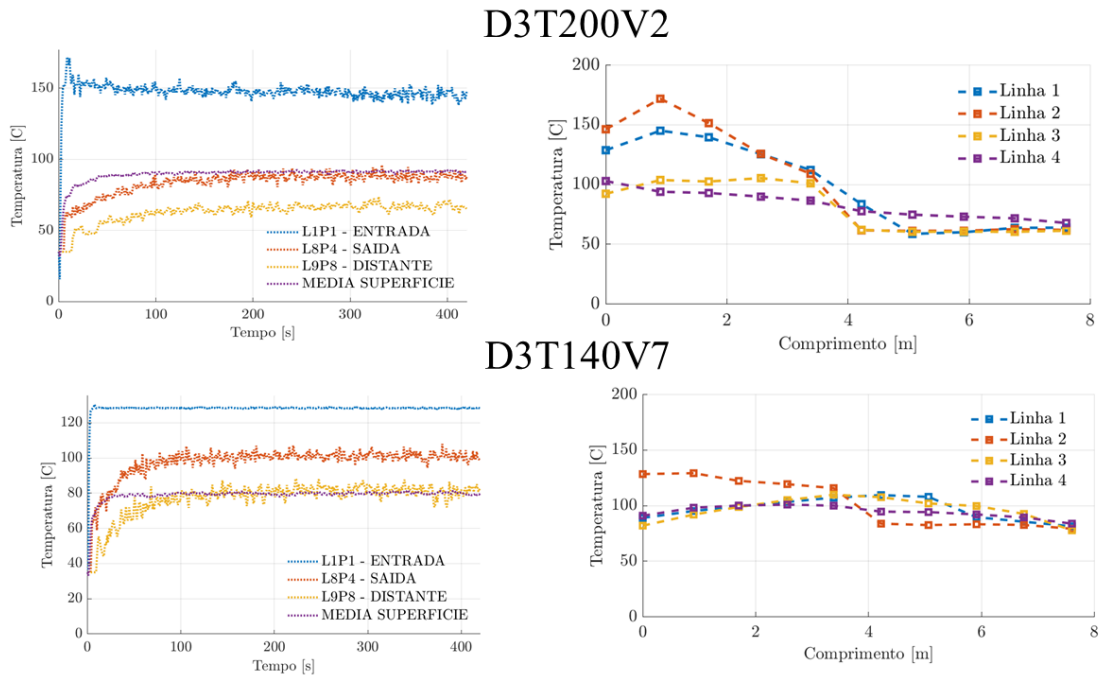


Figura B.12 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V2 e D3T140V7

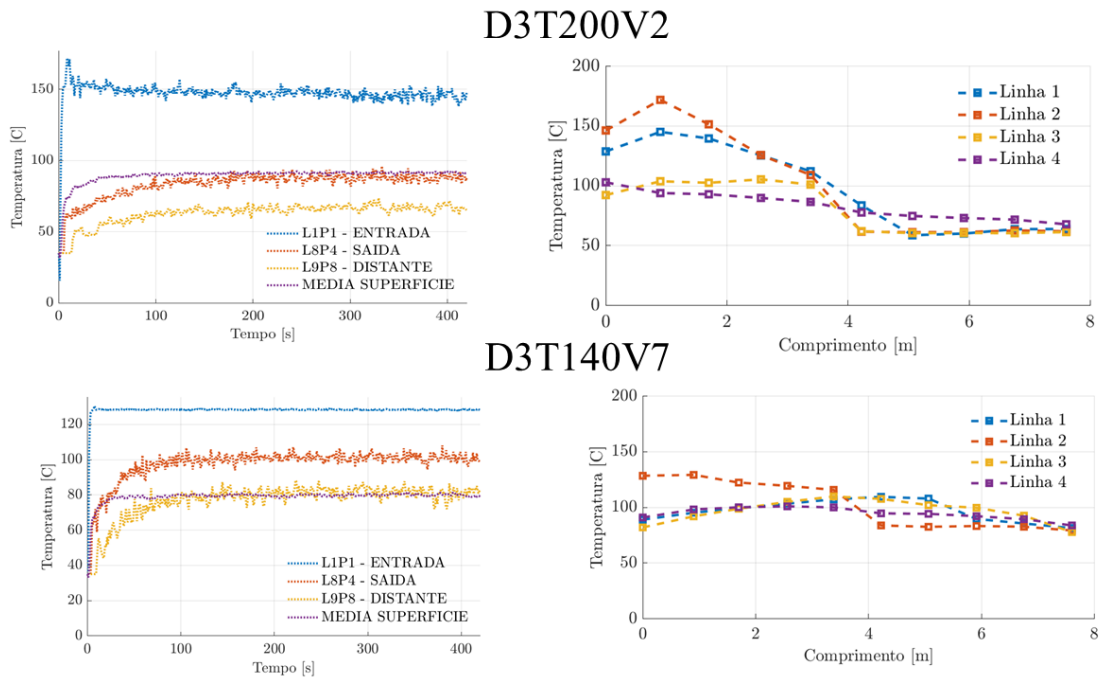


Figura B.13 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T200V2 e D3T140V7

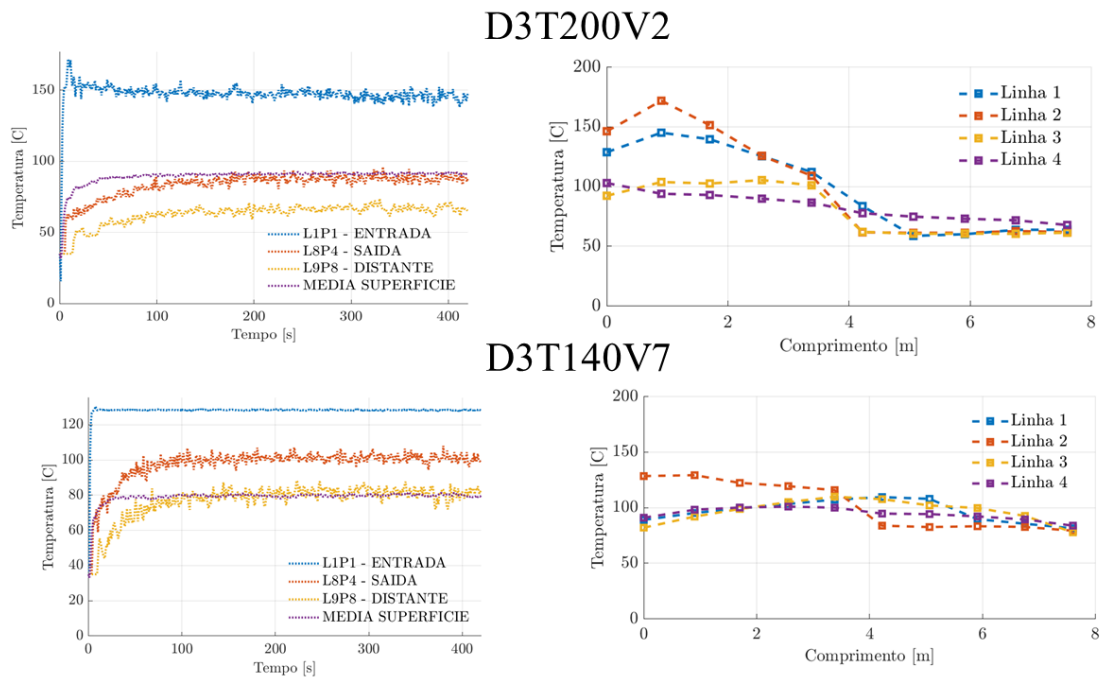


Figura B.14 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T140V7 e D3T140V2

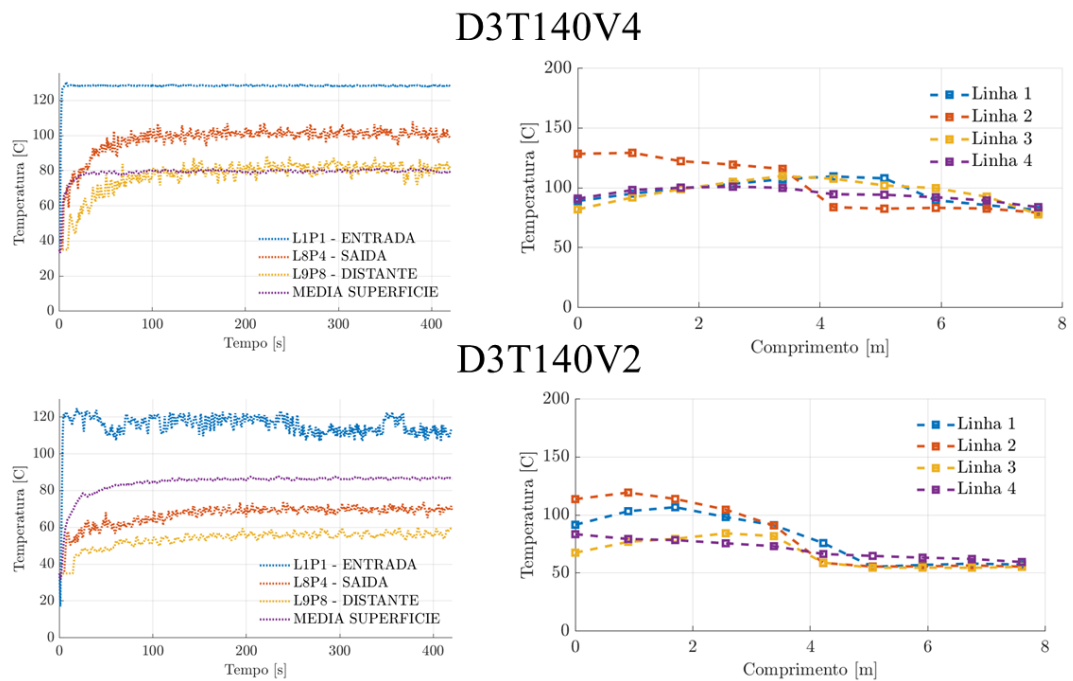


Figura B.15 – Perfis de Temperatura Quantitativos e Estacionários - D3T120V7 e D3T120V4

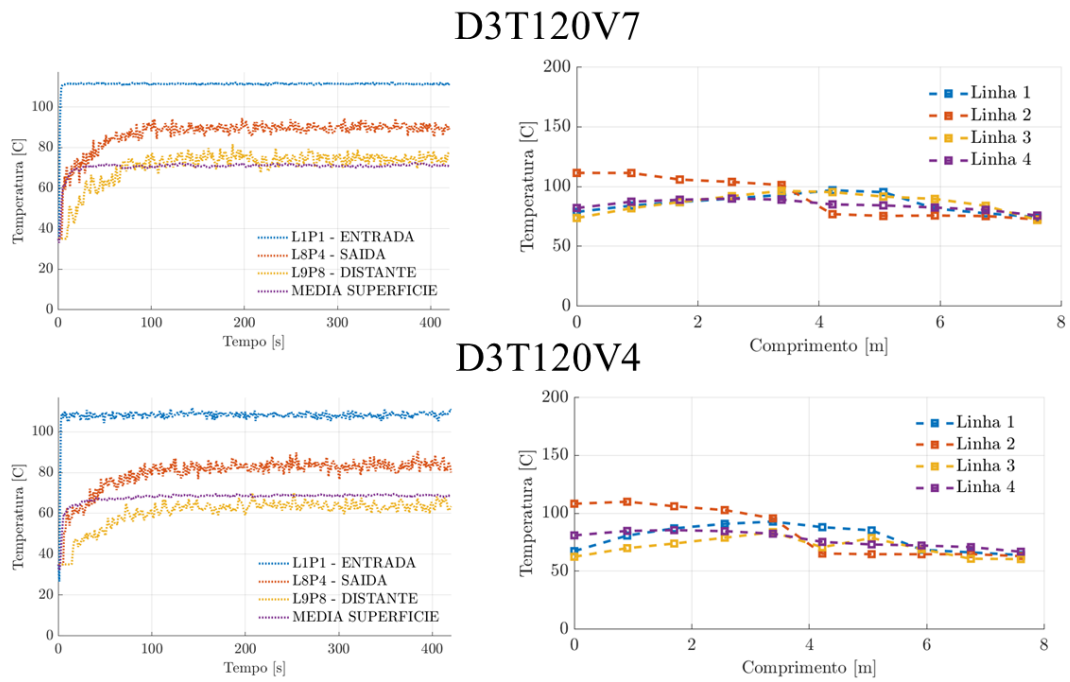
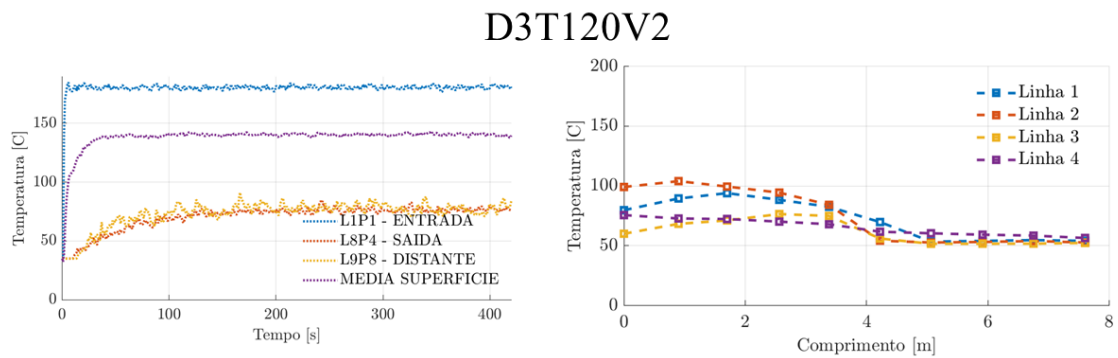


Figura B.16 – Perfil de Temperatura Quantitativo e Estacionário - D3T120V2



**ANEXO A – PLANILHA COM DADOS EXPERIMENTAIS**

<b>DATA E HORA</b>	<b>PONTOS DE MONITORAMENTO EXPERIMENTAL (°C)</b>											
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
12/04/2023 09:30:00	55	70	65	60	75	60	65	60	50	65	60	50
12/04/2023 10:30:00	55	50	50	50	50	50	50	45	45	45	45	45
19/04/2023 09:32:00	95	95	100	95	95	100	100	110	110	100	115	120
19/04/2023 10:51:00	110	100	110	105	80	110	110	110	145	105	150	140
19/04/2023 12:00:00	105	105	110	110	100	115	105	140	140	110	150	130
03/05/2023 09:08:00	100	100	100	100	100	115	100	120	120	115	115	135
03/05/2023 10:38:00	100	100	100	50	95	90	100	115	100	100	135	125