



VINÍCIUS TESSINARI PRAVATO

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E *MOMENTUM* EM UM SECADOR TIPO TÚNEL

Lavras-MG

2023

VINÍCIUS TESSINARI PRAVATO

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E *MOMENTUM* EM UM SECADOR TIPO TÚNEL

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do curso
de Engenharia de Alimentos, para a
obtenção do título de Bacharel

M.sc. Paula Giarolla Silveira

Orientadora

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Coorientador

Lavras-MG

2023

VINÍCIUS TESSINARI PRAVATO

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E *MOMENTUM* EM UM SECADOR TIPO TÚNEL

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do curso
de Engenharia de Alimentos, para a
obtenção do título de Bacharel

Aprovado em 21 de Julho de 2023.

M.sc. Paula Giarolla Silveira, DCA/UFLA

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes, Corrêa DCA/UFLA

Prof. Dr. Roney Alves da Rocha, DCA/UFLA

Prof. Dr. Jéssica Ferreira Rodrigues, DCA/UFLA

Lavras-MG

2023

Dedico este trabalho
Aos meus pais, Antônio Carlos e Luciene
A vovó Maria Margarida
In memoriam da vovó Maria “Mariquinha”
Esta conquista pertence a todos nós

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Antônio e Luciene, por todo apoio e amor incondicional, em todos esses anos. Sem vocês esse sonho nunca seria realizado por isso ele é uma conquista nossa, sou muito grato a vocês por tudo.

A minha família, em especial à minha avó Margarida, por todo apoio mesmo estando longe por tantos anos, também agradeço especialmente a minhas tias Ruti e Margareth que sempre estiveram do meu lado e me apoiando nessa longa caminhada.

Agradeço a minha namorada Maria Theresa, por tudo que você faz por mim, sem você eu não teria chegado até o presente momento.

Aos meus amigos Emanuelle e Vinicius, por toda amizade, conversas, momentos descontraídos e por sempre estarem lá nesses anos.

A Cafesal pelas pessoas e experiências maravilhosas as quais eu tive ali dentro, vocês sempre farão parte da minha história.

Aos amigos Vanessa e Giovanni que sempre estiveram lá durante os anos de graduação.

A Paula minha orientadora e amiga, por toda ajuda e aprendizado nessa jornada.

Ao professor Jefferson pela oportunidade de conhecer o CFD e poder desenvolver esse trabalho.

A todos que contribuíram para que esse trabalho fosse realizado, um muito obrigado!

Resumo

A secagem é uma operação unitária que é empregada na indústria de alimentos para aumentar a vida útil dos alimentos, facilitar o transporte e permitir o consumo de alimentos nos períodos de entressafra. Entre as diversas formas de se realizar essa operação, o secador tipo túnel é um dos equipamentos mais utilizados na indústria e em ambientes laboratoriais para a obtenção de produtos secos com alto valor nutricional. Desse modo o estudo dos fenômenos de transferência de calor, momento e massa, auxilia no entendimento dos processos da operação de secagem que pode ser representada através da simulação computacional através do *software* comercial *Ansys Fluent*. Isto posto, o presente trabalho teve por objetivo utilizar a dinâmica dos fluidos computacional a fim de compreender detalhadamente estes fenômenos e propor melhorias futuras para o equipamento, visando sempre a manutenção da qualidade dos produtos secos, obtendo assim uma simulação com boa acurácia em seus resultados, os quais permitiram o estudo do equipamento, além de sugestões para trabalhos futuros.

PALAVRAS CHAVE: Simulação, CFD, Secagem e Ansys.

Abstract

A drying is a unit operation that is employed in the food industry to increase the shelf life of food, facilitate transportation, and allow for the consumption of food during periods of low production. Among the various methods to carry out this operation, the tunnel dryer is one of the most commonly used equipment in the industry and laboratory settings for obtaining dried products with high nutritional value. Thus, the study of heat, momentum, and mass transfer phenomena helps in understanding the drying operation processes, which can be represented through computational simulation using the commercial software Ansys Fluent. In light of this, the present work aimed to use computational fluid dynamics to thoroughly understand these phenomena and propose future improvements for the equipment, always aiming to maintain the quality of the dried products. This led to a simulation with good accuracy in its results, which allowed for the study of the equipment, as well as suggestions for future research.

KEY WORDS: SIMULATION, CFD, DRYING, ANSYS, TUNNEL DRYER.

Sumário

1	Introdução.....	9
2	Referencial teórico.....	11
2.1	Secador tipo túnel.....	11
2.2	Modelagem matemática.....	11
2.2.1	Equação da continuidade.....	12
2.2.2	Equação de Navier-Stokes.....	13
2.2.3	Equação de energia.....	14
2.3	A camada-limite.....	15
2.3.1	Camada-limite laminar.....	16
2.3.2	Camada-limite turbulenta.....	16
2.3.3	Espessura da camada-limite.....	17
2.3.4	Escoamento próximo da parede.....	18
2.4	Modelos de turbulência.....	19
2.5	Métodos de discretização.....	20
2.5.1	Método dos volumes finitos (MVF).....	20
2.5.2	PRESTO!.....	21
2.5.3	QUICK.....	21
2.5.4	SIMPLE.....	21
3	Materiais e métodos.....	22
3.1	Pré-processamento.....	22
3.2	Processamento.....	24
3.3	Pós-processamento.....	25
4	Resultados.....	26
4.1	Teste de independência de malha.....	26
4.2	Transferência de calor e <i>momentum</i>	27
5	Conclusão.....	32
	Referências.....	33

1 Introdução

O método de secagem reduz a atividade da água dos alimentos, o que, conseqüentemente, reduz a velocidade das reações químicas, enzimáticas e o crescimento de micro-organismos, retardando assim a deterioração dos alimentos. Tendo isto em vista, os secadores tipo túnel têm sido amplamente utilizados em todo o mundo, a fim de promover a secagem de alimentos e, deste modo, aumentar a vida útil de diversos produtos alimentícios.

A temperatura, a distribuição do fluxo gasoso e o *layout* determinam parâmetros operacionais responsáveis pelo aumento da eficiência do equipamento. Diversos trabalhos têm mostrado que os campos de velocidade do ar e de temperatura influem nas taxas de secagem de alimentos no interior de túneis convectiva, visto que, uma distribuição não homogênea impacta em um gradiente de umidade não homogêneo, prejudicando a qualidade do produto (MACEDO et al, 2022; MACEDO et al, 2021). Neste contexto, o estudo da transferência de *momentum* e calor é de suma importância.

O uso da simulação computacional para predição dos campos de temperatura e velocidade em equipamentos industriais utilizados na secagem de alimentos é uma ferramenta que possibilita uma representação da realidade, de forma econômica e eficiente quando comparada a modelos experimentais. A fluidodinâmica computacional, ou como conhecida pela sigla em inglês CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é um método que vem ganhando expressividade por suas aplicações nos mais diversos campos da engenharia e da física. Como Fortuna (2020) destaca, o método computacional permite uma otimização de recursos, possibilitando que processos que antigamente eram necessariamente experimentais e custosos, possam ser realizados através de simulações e somente validados os dados com poucos gastos experimentais.

Na literatura relacionada alguns autores utilizaram a simulação computacional para simular processos de secagem, como pode ser observado no trabalho de Júnior *et. al.* (2022), os autores realizaram simulações no software ANSYS Fluent 18.0 para validar o modelo matemático de secagem de grãos de milho em leito fixo, obtendo boas predições entre os dados numérico computacionais e experimentais.

Na pesquisa de Coradi e Lemes (2017), foi utilizado CFD para desenvolver um protótipo experimental de um secador silo para secagem de grãos, que, ao final do experimento, se mostrou eficiente e viável.

Todavia, cabe salientar que os estudos na literatura referente a simulação computacional aplicada a túneis de secagem no setor de alimentos são escassos. Desse modo, o presente trabalho teve por objetivo o estudo dos campos de velocidade e de temperatura em um secador tipo túnel.

2 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo o estudo dos campos de velocidade e temperatura no secador tipo túnel MD-018.

3 Referencial teórico

3.1 Secador tipo túnel

A secagem trata-se de uma operação unitária amplamente utilizada. Reis (2015), define a secagem como a remoção total ou parcial da água de um produto para um fluxo de ar não saturado, em forma de vapor, sendo esta água originária de um alimento sólido. Conforme destacado pelos referidos autores, entre os benefícios desta operação estão a inibição de crescimento microbiano, além do aumento de vida útil de diferentes alimentos ao prevenir a deterioração decorrente de reações bioquímicas. Como se trata de um processo que pode resultar em diferentes benefícios, a secagem é utilizada há milênios pela humanidade, que ao longo dos séculos aperfeiçoou a operação a diversas aplicações e equipamentos. Dentre algumas destas aplicações, pode-se destacar a utilização da secagem através de secadores de circulação forçada.

Também tem sido relatado o uso de secadores tipo túnel em níveis laboratoriais para determinação de propriedades de grande importância para o processo de secagem e em trabalhos de otimização, como relatado por MACEDO (2020). Durante a secagem convectiva de frutos de butiazeiro (*Butia Capitata*), os quais são realizados determinações de difusividade em diferentes temperaturas, com velocidade de secagem constante.

Secadores do tipo túnel podem operar em sistemas contínuos, semicontínuos ou em bateladas, dependendo da construção do mesmo. Estes aparelhos são constituídos de um grande túnel, podendo adquirir diferentes formatos, como cilíndricos ou retangulares. Quando operam em sistemas contínuos, possuem esteiras ou carrinhos que carregam o material que será seco no interior do túnel.

2.2 Modelagem matemática

A secagem é uma operação unitária que envolve diversos fenômenos físicos, dentre os quais podemos destacar os fenômenos de transferência de calor, massa e *momentum*, desse modo, as equações governantes dessa operação são descritas a seguir.

2.2.1 Equação da continuidade

A equação da continuidade é deduzida através de um balanço de massa integral conforme, a equação 1, porém quando aplicado a um volume de controle elementar, os fluxos de massa podem ser descritos na forma diferencial.

$$\int \frac{\partial \rho}{\partial t} dv + \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{sai} - \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{entra} = 0 \quad (1)$$

Sendo ρ a densidade, t tempo

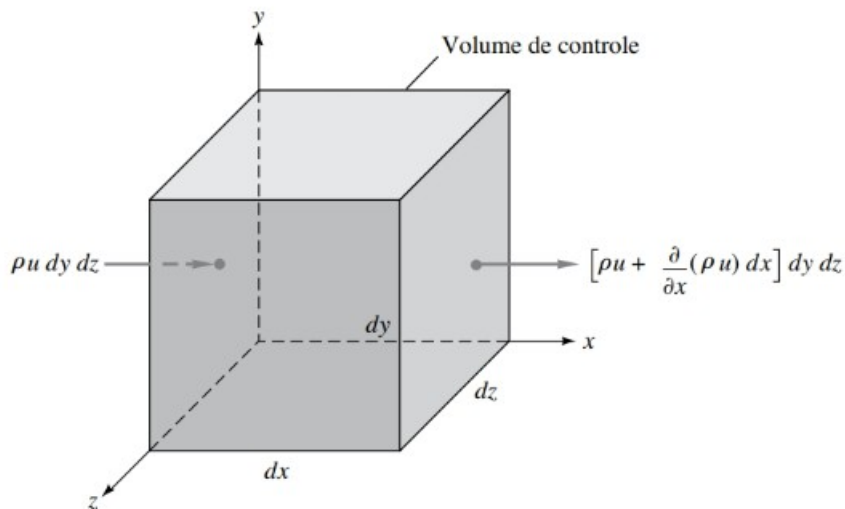
De tal forma que quando analisado o sistema na forma Lagrangiana é possível transformar a equação 1, em sua forma diferencial, no qual os elementos de entrada e saída do volume de controle elementar são apresentados pela tabela 1 e ilustrados na figura 1.

Tabela 1: Fluxos de entrada e saída em um elemento infinitesimal

Face	Fluxo de massa na entrada	Fluxo de massa na saída
x	$\rho u dy dz$	$[\rho u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx] dy dz$
y	$\rho v dx dz$	$[\rho v + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dy] dx dz$
z	$\rho w dx dy$	$[\rho w + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dz] dx dy$

Fonte: Adaptado de WHITE (2018)

Figura 1: Elemento infinitesimal com fluxo de matéria apresentado somente no sentido x



Fonte: WHITE (2018).

Sendo assim se obtêm o balanço de massa diferencial de acordo com a equação 2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \rho w}{\partial z} dx dy dz = 0 \quad (2)$$

Em que ρ é a densidade, t é o tempo, x, y, z são os eixos cartesianos do plano, u é a velocidade linear no eixo x , v é a velocidade linear no eixo y e w é a velocidade linear no eixo z .

Assim, quando o volume elementar $dx dy dz$ é dividido em ambos os lados, se obtêm a forma final da equação da continuidade descrita pelas equações 3, como definido por (SAI MADHURI; UPPALAPATI; JANI, 2021).

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

É possível destacar na equação 3 o termo da taxa de variação de massa $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ definido pela derivada parcial da densidade (ρ) pelo tempo (t) e também o campo de velocidade nas respectivas direções, sendo os termos convectivos (KERCHINER, 2022; VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

2.2.2 Equação de Navier-Stokes

A equação de Navier-Stokes governa os escoamentos de fluidos newtonianos compressíveis e incompressíveis, partindo de princípios simples, como a conservação da massa, do *momentum* (segunda lei de Newton) e da energia, é possível obter uma equação completa que descreve o movimento de fluidos em diversas situações (FORTUNA, 2020).

De acordo com a segunda lei de Newton aplicada para fluidos temos a equação 4.

$$\sum F = \rho \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Considerando que dentro de um volume de controle elementar é possível definir a taxa de variação de *momentum* do fluido como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \quad (5)$$

A equação 5 também é conhecida por representar a aceleração total de uma partícula dentro de um volume de controle elementar (WHITE, 2018).

O fluido é submetido a dois tipos de forças sendo elas de campo e de superfície. As forças de campo são geradas por campos externos e será avaliado somente o campo gravitacional nesta formulação. As forças de superfície aplicadas a um fluido são as tensões viscosas (μ) e a pressão hidrostática (P).

Sendo possível definir que o somatório de forças aplicadas ao fluido é definida pela equação 6:

$$\sum F = \rho g - \nabla P + \nabla \mu_{ij} \quad (6)$$

Assim chegando a forma final da equação de Navier-Stokes para cada componente do espaço xyz. E quando aplicada ao caso deste trabalho considerando um fluido compressível, que possui viscosidade aparente é possível definir o campo de velocidade como na equação 7:

$$\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (9)$$

2.2.3 Equação de energia

O balanço de energia pode ser definido de diversas formas, porém a forma mais usual de se representar é através das temperaturas. Dessa forma é definido o balanço de energia a partir da energia interna do sistema, como definido pela equação 10 (LIGHTFOOT, BIRD, STEWART; 2004).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \hat{U} = -(\nabla \cdot \rho \hat{U} V) - (\nabla \cdot q) - P(\nabla \cdot V) - (\tau : \nabla V) + S_h \quad (10)$$

A equação 10 demonstra os mecanismos de transferência de calor, sendo eles, convecção ($\nabla \cdot \rho \hat{U} V$), condução ($\nabla \cdot q$), compressão ($P(\nabla \cdot V)$), dissipação ($\tau : \nabla V$) e geração espontânea (S_h) (BISWAL, DASH; 2023).

Se a energia interna for entalpia e considerando que ela seja uma propriedade em função de P e T, pode-se reescrever a equação na forma da equação 11

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot ((K \nabla \cdot T) - (\tau \cdot V)) - \sum_j h_j J_j + S_h \quad (11)$$

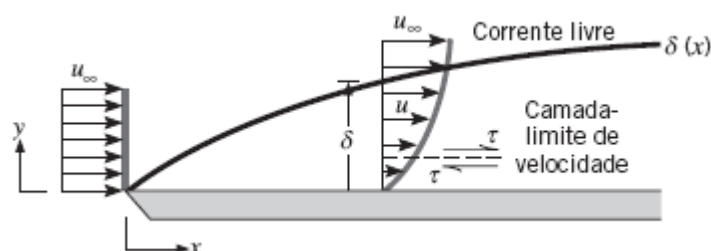
Em que o termo os termos convectivos, condutivos e de dissipação viscosa são associados pelo operador divergente (SILVEIRA, 2021; LOU, et al 2019)

2.3 A camada-limite

Pode-se definir a camada limite como um efeito da resistência viscosa ao movimento das partículas do fluido sobre as superfícies fixas, formando regiões de grande interesse de estudos devido as características as quais elas apresentam por possuírem maior gradiente de velocidade e temperatura necessitando assim de uma maior compreensão dos escoamentos nas regiões de parede (BERGMAN, et al, 2014).

O desenvolvimento da camada-limite se dá através do encontro do fluido com uma superfície fixa gerando uma camada estagnada, devido a condição de não deslizamento. Essa primeira camada que possui velocidade nula gera uma resistência ao movimento das outras camadas que se propaga pelo fluido, até a zona de livre corrente na qual não é mais sentida a resistência gerada pela camada-limite conforme a figura 2 (VERGEL, 2013).

Figura 2: Esquema de camada-limite



Fonte: Adaptado de BERGMAN, et al (2014).

As camada-limite pode ser dividida em 3 diferentes regiões, sendo ela laminar, transição e turbulenta. A região laminar é caracterizada por um escoamento ordenado das camadas de fluido, porém com o aumento da espessura da camada-limite, é formado uma zona intermediária, com regiões inferiores laminares e regiões superiores que apresentam um escoamento turbulento, sendo conhecida como camada de transição.

2.3.1 Camada-limite laminar

A camada-limite laminar pode ser descrita através de equações derivadas da equação de Navier-Stokes, como apresentado por Prandtl em 1904, permitindo uma grande evolução de cálculo com métodos limitados (FERREIRA SOARES; NOGUEIRA; GOMES PIMENTEL, 2019)

Segundo Everts et al (2022), se classifica a camada-limite laminar em desenvolvimento e completamente desenvolvidas. Tal divisão é feita em relação ao escoamento plenamente desenvolvido ao qual é considerado nos escoamentos.

2.3.2 Camada-limite turbulenta

E a camada-limite turbulenta é caracterizada por uma movimentação irregular, predita pelo modelo de turbulência que será descrito mais a frente.

Segundo Silveira (2021), a camada-limite turbulenta é dividida em três zonas, a primeira é a subcamada viscosa, seguida pela camada de amortecimento e a zona turbulenta como mostrado na figura 3.

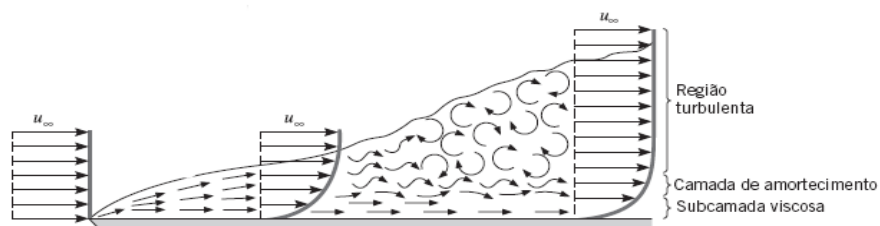


Figura 3: Esquema de subcamadas da região próxima a parede

A subcamada viscosa é caracterizada por um perfil de velocidade laminar, causando assim o principal mecanismo de transporte interno por difusão de calor , pois a viscosidade molecular tem importante função nas transferências de calor e massa (SILVEIRA, 2021; BERGMAN, et al, 2014).

A camada de amortecimento sofre ações tanto de mecanismo de difusão, quanto dos efeitos turbulentos. E a camada turbulenta, na qual os efeitos turbulentos dominam os mecanismos de transferência de calor e massa (VERGEL, 2013).

2.3.3 Espessura da camada-limite

A espessura da camada limite é um importante parâmetro de análise dentro do escoamento, devido a região sofrer com diferentes fenômenos, esta representação da espessura da camada-limite se torna um considerável critério de análise . Dessa maneira a equação utilizada para determinar o valor de espessura calculada ($\delta_{calculada}$), segundo Bird, Stewart e Lightfoot (2004) é obtida através das equações da continuidade e de Navier-Stokes.

De tal forma que se encontra a equação 11 (BERGMAN, et al, 2014).

$$\frac{\delta_{calculada}}{L} = \frac{5}{\sqrt{Re^5}} \quad (12)$$

A equação 12 relaciona a espessura da camada-limite com o número de Reynolds em regiões de escoamento laminares, para que as considerações simplificadoras possam ser aplicadas.

A espessura da camada-limite simulada ($\delta_{simulada}$) também é grande relevância para o entendimento da simulação, com isso a equação 13 determina tal parâmetro

$$\delta_{simulada} = NC [TMAE - TMIE] \quad (13)$$

De tal forma que é possível determinar que a camada-limite calculada está dentro da camada-limite simulada, garantindo assim que a simulação capturou corretamente a zona de escoamento de interesse.

2.3.4 Escoamento próximo da parede

Para a captura da camada-limite, é necessário que o escoamento próximo à parede seja representativo e dessa forma é imprescindível que a malha esteja com o refino correto em toda a região. E o parâmetro utilizado para a análise da região é o y^+ .

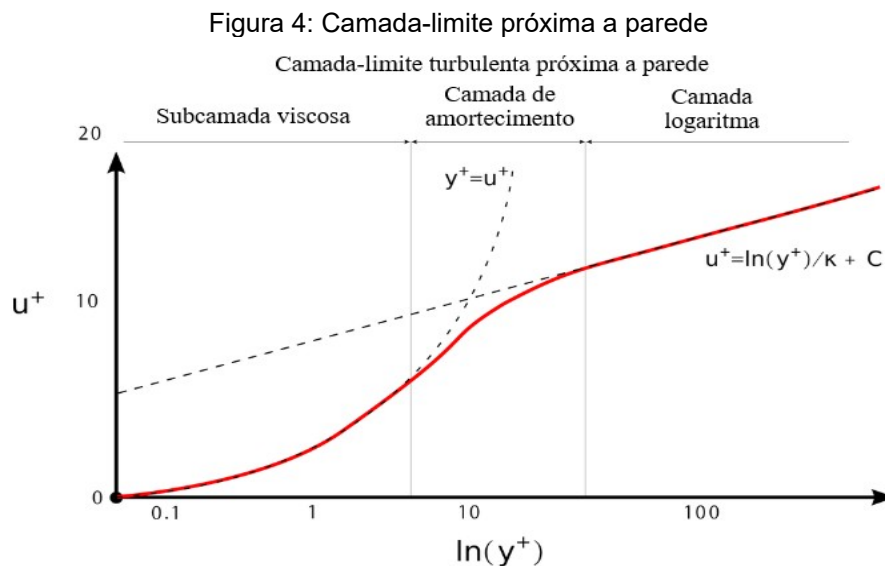
O y^+ é um parâmetro de grande importância, pois relaciona a distância adimensional da parede da geometria até o primeiro elemento de malha. Também é possível relacionar as zonas da camada-limite através do y^+ conforme a figura 4.

Segundo Silveira (2021) quando os valores de y^+ estão entre 0 e 5, está na subcamada viscosa e são calculados a partir da equação 13, já entre 5 e 30 está na camada de amortecimento e em valores de y^+ superiores a 30 ele segue um perfil logarítmico de acordo com a equação 15.

$$y^+ = \frac{f_t \Delta y_1 \rho}{\mu} \quad (14)$$

$$u^+ = \ln y^+ / \kappa + C \quad (15)$$

Onde C é uma constante e κ é a equação da distribuição da energia cinética.



Fonte: Understanding y^+ for CFD Simulations

2.4 Modelos de turbulência

A modelagem do escoamento turbulento sempre representou um desafio na mecânica de fluidos computacional, devido à complexabilidade da movimentação aleatória e trajetórias irregulares. Contudo devido as características do escoamento turbulento se faz necessário a utilização de modelos e métodos específicos para sua resolução.

Existem três principais métodos, além da combinação de dois desses métodos, sendo eles: As simulações numéricas de escoamentos turbulentos, através de equações médias de Reynolds (RANS-*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), as quais se derivam modelos matemáticos como o κ - ϵ e o κ - ω , os quais serão descritos ao decorrer deste tópico. A simulação de grande escalas (LES- *Large Eddy Simulation*) e a simulação numérica direta (DNS-*Direct Numerical Simulation*) além de sua combinação (LES/DNS), os quais são métodos que apresentam necessidades computacionais mais elevados e malhas mais refinadas para uma melhor precisão do modelo (WRONSKI et al., 2022).

Os principais modelos de turbulência de RANS são o κ - ϵ e o κ - ω , no qual são resolvidos duas equações, a primeira para a distribuição da energia cinética turbulenta (κ) e a segunda equação a distribuição da frequência de turbulência (ω) sendo descritas pelas equações 16 e 17.

$$\frac{\partial(\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \kappa}{\partial x_j} = -\bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\mu + \sigma' \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}) - \beta' \kappa \omega \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \omega}{\partial x_j} = -\bar{u}'_i \bar{u}'_j \alpha \frac{\omega}{\kappa} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) - \beta \omega^2 \quad (17)$$

Nos quais os coeficientes α , β , β' , σ e σ' são constantes com valores iguais a $\frac{13}{25}$, $\frac{9}{125}$, $\frac{9}{100}$, $0,5$ e $0,5$ respectivamente e o coeficiente μ_t representa viscosidade turbulenta descrita pela equação 17 (WILCOX, 2008)

$$\mu_t = c_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (18)$$

O modelo de turbulência κ - ω apresenta robustez e é bem validado para diferentes valores de número de Reynolds, permitindo uma transição suave na região próxima a parede para o livre escoamento (YOU, et al, 2020).

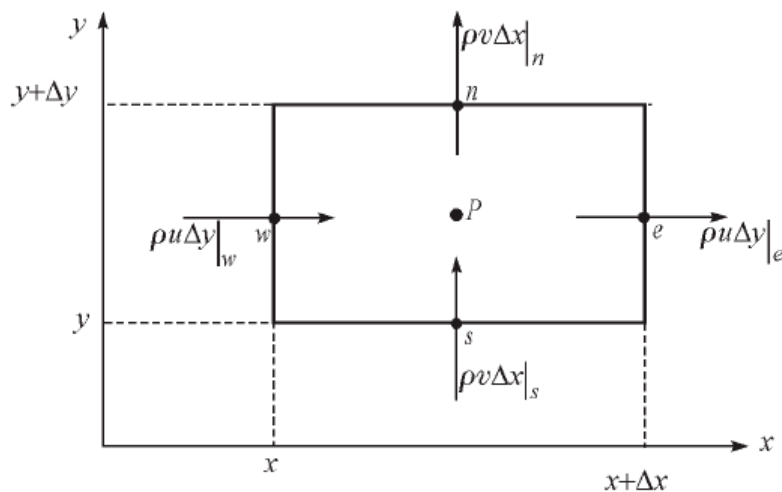
2.5 Métodos de discretização

2.5.1 Método dos volumes finitos (MVF)

O método escolhido para a discretização espacial e temporal dos modelos matemáticos foi o de volumes finitos, o qual é definido por Maliska (2004), como o balanço das propriedades nos volumes elementares ou através das formas conservativas das equações diferenciais das propriedades do escoamento.

A demonstração realizada para o MVF será realizada discretizando a equação da continuidade bidimensional (equação 19) para um elemento de volume finito descrito na figura 5.

Figura 5: Balanço de massa no volume de controle finito



Fonte: Adaptado de Maliska, 2004

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (19)$$

Partindo da equação 18 da continuidade bidimensional para o sistema da figura 5, que está em sua forma conservativa e integrando dentro do volume finito podemos obter a aproximação numérica conforme as equações 20 e 21.

$$\int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) \right] = 0 \quad (20)$$

$$\int_s^n [\rho u|_e - \rho u|_w] dy + \int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx = 0 \quad (21)$$

Como resultado da integral da equação 21, podemos escrever a equação 22, no qual mostra o efluxo líquido de massa elementar através do método dos volumes finitos.

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (22)$$

2.5.2 PRESTO!

O método de discretização da equação de pressão PRESTO!, permite o cálculo de maneira escalonada da pressão em malhas não-estruturadas, pois calcula a pressão na face dos elementos de malhas (SILVEIRA, 2021).

2.5.3 QUICK

O método QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics*), utiliza um perfil quadrático de interpolação em todas as faces do volume de controle (RODRIGUES, 2019).

2.5.4 SIMPLE

Patankar e Spalding (1972) desenvolveram o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* ou Método semi-implícito para equações ligadas a pressão) com o objetivo de resolução do cálculo de acoplamento de pressão, como o de pressão-velocidade.

3 Materiais e métodos

O presente tópico descreve os materiais e métodos utilizados para a execução deste trabalho.

3.1 Pré-processamento

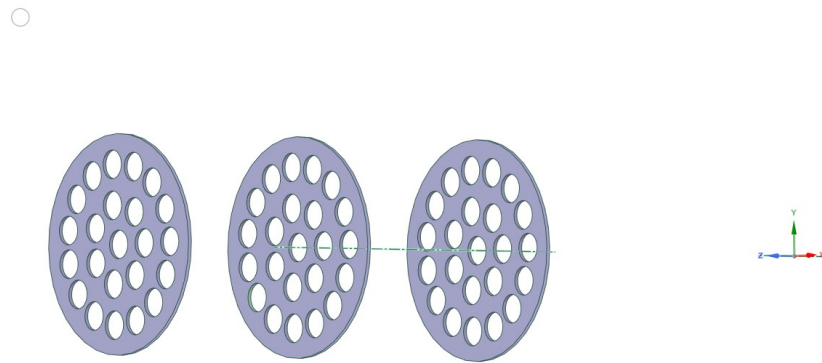
A criação da geometria foi realizada através do pacote de desenho *SpaceClaim 2020 R2* do software comercial *ANSYS 2020 R2*, a partir de dados fornecidos pela empresa Eco Engenharia Educacional, do secador modelo MD018, conforme apresentado na figura 6 e 7.

Figura 6: Geometria do secador tipo túnel



Fonte: Do autor

Figura 7: Placas direcionadoras



Fonte: Do autor

A partir da geometria foi-se utilizado o *software Fluent meshing*, para a discretização dos domínios para o estudo do teste de independência de malha.

O refino da malha global segue os dados da tabela 2

Tabela 2: Refino global das malhas de 1 a 4

Malhas	Tamanho	Tamanho
	mínimo (m)	máximo (m)
Malha 1	0,0022456	0,0574893
Malha 2	0,0022456	0,0074893
Malha 3	0,0012456	0,0054893
Malha 4	0,0012456	0,0054893

Fonte: Do autor

A malha de região de parede foi criada com um refino que variou de 5 a 9 camadas, a fim de se aumentar a precisão do cálculo de camada-limite na região de interesse, possibilitando a melhor captura das camadas hidrodinâmica e térmicas. O elemento de malha utilizado foi o *poly-hexacore*.

A simulação foi realizada utilizando o pacote comercial *Ansys Fluent 2020 R2*, no qual foram setados as condições de contorno das simulações dispostas na tabela 3

Tabela 3: Condições de contorno

Condição de entrada	Valor
Velocidade de entrada do ar na entrada	3,34 m/s
Intensidade turbulenta na entrada	4,55%
Diâmetro Hidráulico na entrada	0,10237 m
Temperatura do fluido na entrada	50 °C
Intensidade turbulenta na saída	4,88%
Diâmetro Hidráulico na saída	0,19353 m
Pressão de operação no local	90281,15 Pa
Gravidade	-9,81 m/s ² (No eixo Y)

Fonte: Do autor

3.2 Processamento

O processamento foi realizado com a escolha dos métodos que melhor se encaixavam no problema proposto para uma rápida resolução com o menor custo computacional.

Na tabela 4 são apresentados todos os métodos utilizados para a discretização das equações governantes aplicadas ao problema

Tabela 4: Métodos de discretização utilizados para cada acoplamento

Uso	Método
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE
Pressão	PRESTO!
Momentum	First order upwin
Energia cinética turbulenta	First order upwin
Taxa de dissipação específica	First order upwin
Gradiente	Least squares cells based
Energia	QUICK

Fonte: Do autor

3.3 Pós-processamento

Foi utilizado o CFD *post* para visualização dos contornos

4 Resultados

4.1 Teste de independência de malha

O estudo da malha computacional foi realizado a partir do parâmetro de escoamento próximo a parede y^+ , em cada uma das malhas (malha 1, 2 e 3), para determinar qual o refino necessário a simulação. Através da associação desse parâmetro com a espessura da camada-limite hidrodinâmica é possível determinar a malha com o tamanho necessário para o melhor resultado das simulações.

De acordo com a tabela 5, temos a relação do tamanho das malhas com o y^+ calculado para cada uma das simulações realizadas.

Tabela 5: Parâmetros de malha no teste de independência de malha

Malha	Tamanho mínimo (m)	Tamanho máximo (m)	Número de camadas	Número de elementos	δ_{simulada}	y^+
Malha 1	$1,86 \times 10^{-11}$	$1,40 \times 10^{-5}$	5	401454	$9,30 \times 10^{-11}$ – $7,02 \times 10^{-5}$	8,25
Malha 2	$9,08 \times 10^{-12}$	$5,80 \times 10^{-6}$	7	831516	$6,36 \times 10^{-11}$ – $4,06 \times 10^{-5}$	2,38
Malha 3	$2,27 \times 10^{-12}$	$7,92 \times 10^{-6}$	9	1251974	$2,04 \times 10^{-11}$ – $7,13 \times 10^{-5}$	1,23

Fonte: Do autor

A partir da tabela 5 é possível observar que com o aumento do refino no número de camadas na região de parede e com a redução do tamanho dos elementos o y^+ , tende a diminuir atingindo o parâmetro desejado para o modelo de turbulência utilizado, que deve ser entre 0 e 2 (SALIM, CHEACH; 2009; YOU et al., 2020).

E quando é analisado a espessura da camada-limite simulada (δ_{simulada}) que está entre $2,04 \times 10^{-11}$ a $7,13 \times 10^{-5}$ (m) é perceptível que em todas as malhas foi possível capturar a mesma faixa de camada, já a espessura da camada-limite calculada ($\delta_{\text{calculada}}$) é de $5,83 \times 10^{-10}$ (m), estando contida dentro da faixa δ_{simulada} .

Porém quando analisado com o y^+ , as malhas 1 e 2 obtiveram elevados valores, influenciando diretamente nos tamanhos dos elementos de parede, que por consequência atingem diretamente o trabalho do método numérico, reduzindo a precisão do cálculo na região.

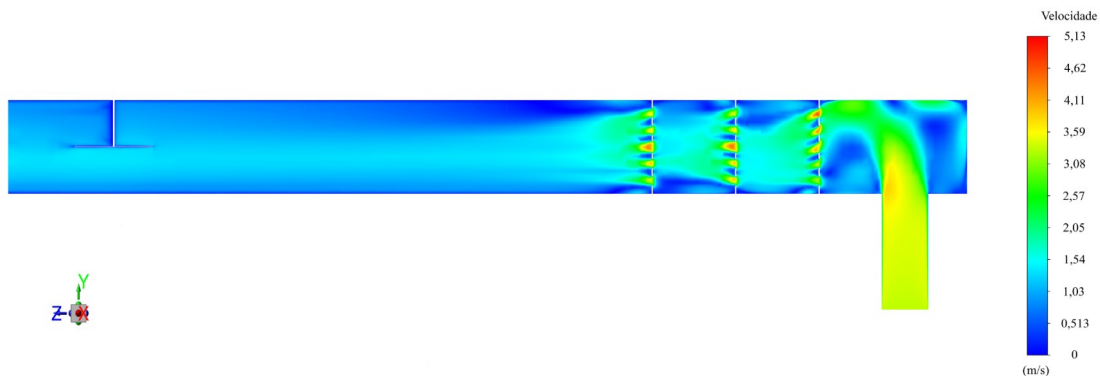
Desta forma a malha que obteve o melhor desempenho e características adequadas para serem utilizadas para a simulação foi a malha 3.

4.2 Transferência de calor e *momentum*

A figura 8 mostra o perfil de velocidades de escoamento.

Como é possível observar na figura 8, o perfil de velocidade, o secador possui regiões com características diversas de escoamento, as quais não são de interesse para o equipamento. Por tal motivo, é necessário à presença das placas direcionadoras do escoamento, que transformam o perfil turbulento em laminar, e conforme o destaque da figura 9, é oportuno a visualização de regiões com recirculação de fluxo e de baixa velocidade.

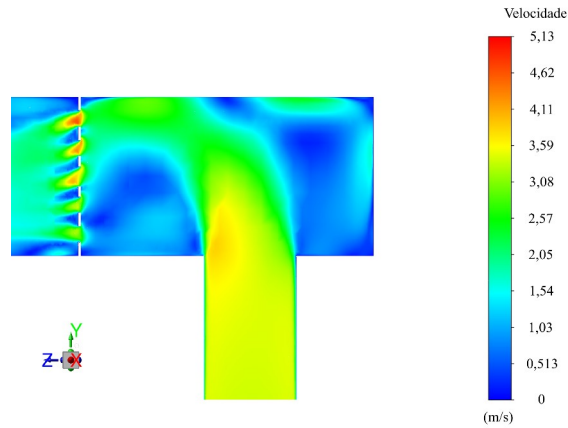
Figura 8: Perfil de velocidade



Fonte: Do autor

A geometria e posicionamento das placas permite que o fluxo que entra em alta velocidade seja direcionado, como mostrado na figura 9. A primeira câmara, apresenta um escoamento em alta velocidade devido a entrada à 90° da entrada, gerando uma região de acúmulo na parte superior, como apontado na figura 9.

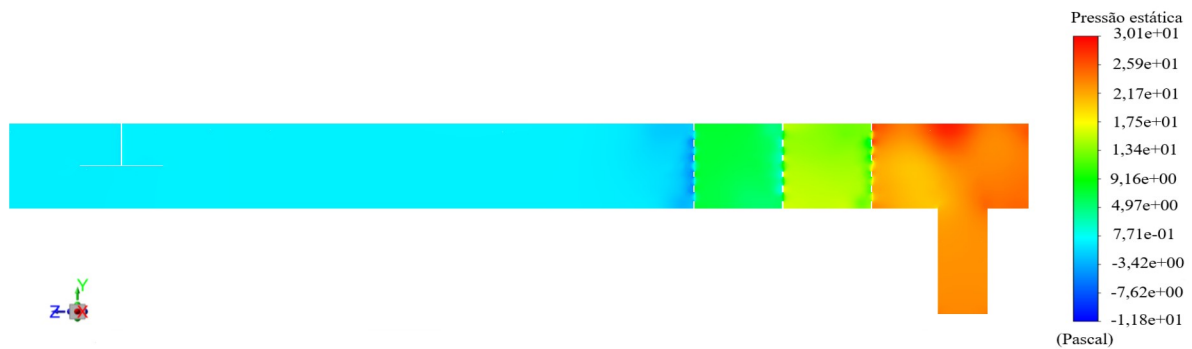
Figura 9: Corte da primeira parte do perfil de velocidade



Fonte: Do autor

Essa região de acúmulo superior na primeira câmara poderia gerar uma distribuição hidrodinâmica desigual, todavia quando analisado o perfil de pressão conforme a figura 10 é perceptível a diferença entre as câmaras, observando um gradiente entre a região de maior pressão para de menor pressão.

Figura 10: Perfil de pressão



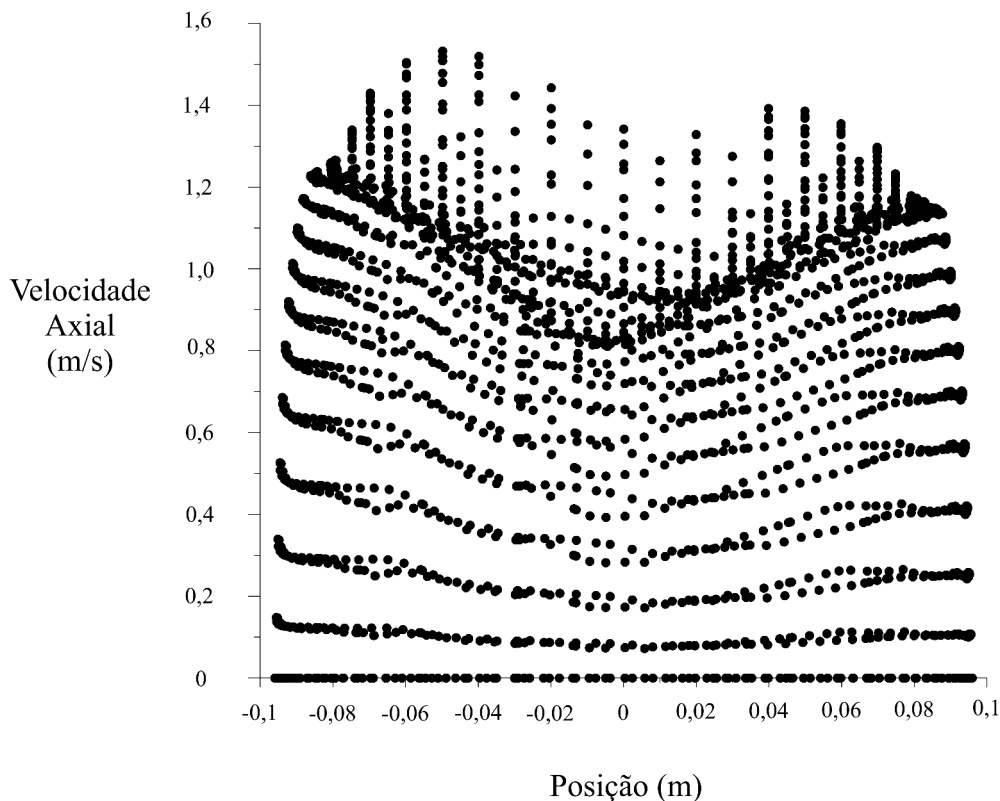
Fonte: Do autor

Dessa forma, quando o fluido em baixa velocidade encontra a barreira das placas direcionadoras, que possuem um diâmetro de furo menor que o diâmetro do túnel de secagem, e que, graças à diferença de pressão entre as câmaras, faz com que o fluido sofra um aumento abrupto de velocidade, permitindo assim uma melhor distribuição do ar dentro da segunda câmara do secador.

Chegando no porta-amostra com um fluxo laminar completamente desenvolvido permitindo dessa forma uma melhor distribuição do fluxo gasoso por toda área superficial do porta-amostras.

Quando analisamos a velocidade axial no final do duto do secador obtemos a figura 11, o perfil de velocidade é afetado pelas placas distribuidoras na qual ele gera dois picos de velocidade e um meio de menor velocidade Também é destacável a observação da velocidade nas paredes ser 0 (m/s), comprovando que as partículas não sofrem o escorregamento na parede.

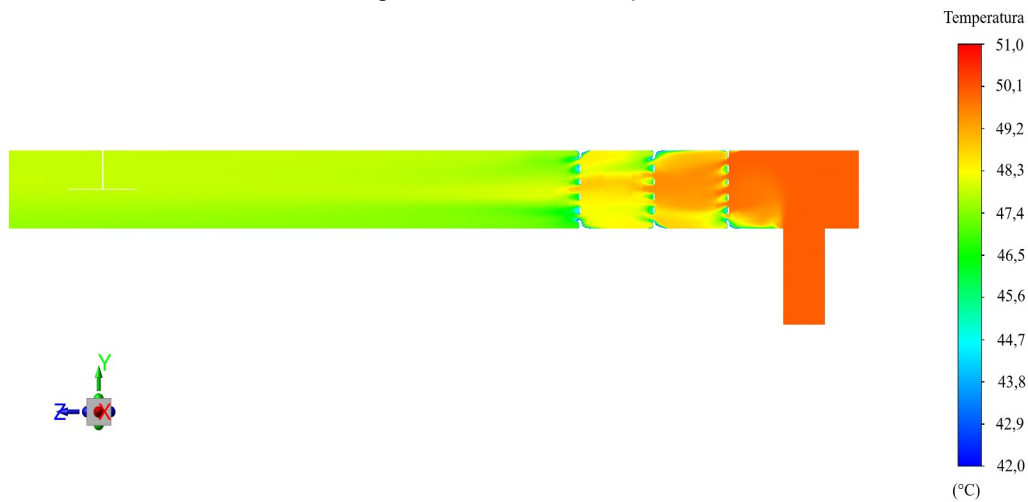
Figura 11: Gráfico com a distribuição da velocidade axial



Fonte: Do autor

A figura 11, mostra o perfil de temperatura dentro do secador, demonstrando como ocorre a redução de temperatura dentro do túnel de vento até o porta-amostras, é possível visualizar a perda de calor na região de maior turbulência conforme observado na figura 11, sendo de grande importância a associação dos perfis de velocidade e térmicos para a compreensão do equipamento.

Figura 12: Perfil de temperatura



Fonte: Do autor

Com a análise dos dois perfis é possível ver que na região das placas direcionadoras ocorrem acúmulos térmicos, e, quando comparado com a temperatura de saída no porta-amostra com a temperatura no interior das câmaras, é possível observar que existe esse acúmulo térmico.

Como as regiões de maior velocidade apresentam um maior coeficiente de troca térmica por convecção, isso eleva a temperatura dessas regiões, como se pode perceber nos furos das placas direcionadoras e nas regiões iniciais do túnel, que apresentam maior velocidade (HOANG et al, 2020).

A distribuição de temperatura simulada no porta-amostra também se mostrou muito próxima aos valores obtidos experimentalmente, comprovando que a simulação de transferência de calor foi representativa.

Tabela 6: Comparação entre a temperatura final experimental e simulada

Dados	Sensor	Temperatura (°C)
Experimental	1	48,31
	2	48,13
	3	48,38
	4	47,63
	5	48,06
Simulado	1	47,87
	2	47,99
	3	47,89
	4	48,04
	5	47,85

Fonte: Do autor

5 Conclusão

Mostrando-se uma excelente ferramenta de predição para o problema com a simulação obteve resultados satisfatórios com os modelos utilizados, comprovando que a malha obteve o refino necessário para os cálculos das propriedades do escoamento.

O trabalho obteve que a partir do estudo das malhas a malha 3 de maior refino foi a melhor para o caso estudado, obtendo valores de y^+ reduzidos com maior acurácia de cálculo. O perfil de velocidades apresentou que as velocidades nas proximidades do porta amostra foram de aproximadamente 1,27 m/s, velocidade semelhante a esperada pelas especificações do equipamento.

De tal forma que as placas direcionadoras foram capazes de cumprir suas funções de distribuição do escoamento de forma uniforme, garantindo um escoamento uniforme.

O presente trabalho traz abertura para futuros estudos na área de otimização do secador tipo túnel, além de estudos com amostras para análise da transferência de massa das amostras para o ar. Tais estudos visando sempre melhorar a eficiência do equipamento e precisão das análises de fluidodinâmica computacional

Referências

BARBOSA, F. et al. Validação do modelo matemático de secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando CFD / Validation of the mathematical model of corn grain drying in fixed bed using CFD. v. 8, n. 6, p. 48209–48227, 28 jun. 2022.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2014. xvi, 672 p.

BISWAL, G.; SUKANTA KUMAR DASH. **An isothermal constant surface area horizontal helical coil under natural convection and radiative heat loss: A CFD study**. v. 145, p. 106846–106846, 1 jun. 2023.

CORADI, P. C.; LEMES, A. F. C. Experimental prototype of silo-dryer-aerator of grains using Computational Fluid Dynamics (CFD) system. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, n. 1, p. 36949, 29 maio 2019.

DUY VO HOANG et al. Experimental measurement and numerical modelling of cooling rates of bulk-packed chicken drumsticks during forced-air freezing. v. 114, p. 165–174, 1 jun. 2020.

FERREIRA SOARES, M. V.; NOGUEIRA, É.; GOMES PIMENTEL, L. C. Camada limite em superfícies lisas e inclinadas: revisitando o método da similaridade. **Cadernos UniFOA**, v. 14, n. 41, p. 17–36, 3 dez. 2019.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Edusp, 2020.

GIAROLLA SILVEIRA, P. **Simulação Computacional De Transferência De Momentum E Calor Em Um Túnel De Congelamento**. Dissertação para a obtenção do título de Mestre—Universidade Federal de Lavras: [s.n.].

KERCHINER, G. V. **Um Modelo Simplificado para Estudo da Ventilação Mecânica de Pacientes**. Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Matemática Aplicada—Universidade Federal do Rio

Grande do Sul. Instituto de Matemática e Estatística. Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada.: [s.n.].

LIGHTFOOT, Neil R.; BIRD, R B.; STEWART, Warren E. **Fenômenos de Transporte, 2ª edição**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2004

LOU, J. et al. Computational fluid dynamics simulations of polarization phenomena in direct contact membrane distillation. **Journal of Membrane Science**, v. 591, p. 117150, 1 dez. 2019.

MACEDO, L. L. et al. Convective drying of *Butia Capitata* pulp: effect of air temperature on kinetic and quality parameters. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e73791110583, 2 dez. 2020.

MACEDO, L. L. et al. Convective Drying with Ethanol Pre-treatment of Strawberry Enriched with Isomaltulose. *Food and Bioprocess Technology*, v. 14, n. 11, p. 2046–2061, 16 set. 2021.

MACEDO, L. L. et al. Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. *LWT*, v. 155, p. 112918, fev. 2022.

MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. 2. ed., rev. e ampl. Rio de Janeiro, RJ

PATANKAR, S. e SPALDING, D. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 15, n. 10, 1787–1806, oct 1972

REIS, D. R. DOS et al. Influência das características do ar na cinética de secagem de pimenta variedade bico. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n. 2, p. 146–154, jun. 2015.

RODRIGUES, G. Desempenho de esquemas de discretização em volumes finitos na equação de transporte advectiva-difusiva. 2019. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019

SAI MADHURI, K.; UPPALAPATI, S.; JANI, S. P. Modeling and simulation of aerothermodynamics hot radiant blunt body. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 8133–8137, 2021.

Salim, S. M., & Cheah, S. (2009). **Wall Y strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows**. In *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists* (Vol. 2, pp. 2165-2170).

Understanding Y+ for CFD Simulations. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/understanding-y-cfd-simulation-sijal-ahmed>>.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da influência da malha computacional, modelos de turbulência e aspectos numéricos da modelagem CFD em impelidores PBT usando malhas não-estruturadas**. 2013. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

VERSTEEG, H. K.; WEERATUNGE MALALASEKERA. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Harlow: Pearson Education, 2007.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH Ed., 2018. xvi, 846 p.

WILCOX, D. C. Formulation of the k- ω Turbulence Model Revisited. **AIAA Journal**, v. 46, n. 11, p. 2823–2838, nov. 2008.

WRONSKI, T. et al. Numerical simulation through Fluent of a cold, confined and swirling airflow in a combustion chamber. v. 96, p. 173–187, 1 ago. 2022.

YOU, Y. et al. URANS of turbulent flow and heat transfer in divergent swirl tubes using the k- ω SST turbulence model with curvature correction. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 159, p. 120088, out. 2020.