

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

**FRANCIANE CRISTINA RODRIGUES CARVALHO**

**OTIMIZAÇÃO E ESTUDO NUMÉRICO DO TEOR DE UMIDADE EM LEITO FIXO DE  
GRÃOS DE ARROZ DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM**

**Belo Horizonte,  
2019**

**FRANCIANE CRISTINA RODRIGUES CARVALHO**

**OTIMIZAÇÃO E ESTUDO NUMÉRICO DO TEOR DE UMIDADE EM LEITO FIXO DE  
GRÃOS DE ARROZ DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM**

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós Graduação em Engenharia da Energia , em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Orientador: Profº. Drº. José Leônicio Fonseca de Souza.

Coorientador: Profº. Drº. Ralney Nogueira de Faria.

**Belo Horizonte,  
2019**

C331o Carvalho, Franciane Cristina Rodrigues  
Otimização e estudo numérico do teor da unidade em leito fixo de grãos de arroz durante o processo de secagem. / Franciane Cristina Rodrigues Carvalho. – – Belo Horizonte, 2019.  
109f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, 2019.

Orientador: Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza  
Coorientador: Prof. Dr. Ralney Nogueira de Faria

#### Bibliografia

1. Energia – Exergia – Análise. 2. Secagem – Grãos. 3. Modelos Matemáticos. I. Souza, José Leôncio Fonseca de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.4021



**MESTRANDA:** Franciane Cristina Rodrigues Carvalho

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA:** NÍVEL MESTRADO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**

***Otimização e Estudo Numérico do Teor de Umidade em Leito Fixo de Grãos de Arroz durante o Processo de Secagem***

**ORIENTADOR:** José Leônicio Fonseca de Souza

**COORIENTADOR:** Prof. Dr. Ralney Nogueira de Faria

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do departamento de Engenharia Mecânica (Sala 100) do CEFET-MG, campus II, em 02 de agosto de 2019, às 14:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Leônicio Fonseca de Souza  
CEFET-MG

Prof. Dr. Ralney Nogueira de Faria  
CEFET-MG

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima  
CEFET-MG

Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri  
CEFET-MG

Profa. Dra. Wanyr Romero Ferreira  
IETEC

Belo Horizonte, 02 de agosto de 2019

*Dedico este trabalho à minha mãe adotiva,  
Lázara: seu apoio foi fundamental para que  
eu permanecesse sempre em frente.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos professores e funcionários do programa de Pós graduação em Engenharia da Energia pela disponibilização de espaço e tempo para que o curso ocorresse da melhor forma possível. Em especial, agradeço ao coordenador do curso Frederico Romagnoli Silveira Lima, pela receptividade e solicitude; ao meu orientador José Leôncio Fonseca de Souza pela paciência nos momentos de crise e ao meu co orientador Ralney Nogueira de Faria pelas preciosas orientações.

Agradeço também à minha família por estar sempre presente: nas horas de partida e chegada, de sucesso e dificuldades. Em especial, à minha mãe adotiva Lázara pelo apoio incondicional, ao meu irmão Victor pelo carinho demonstrado, à minha mãe biológica Cristina e à minha irmã Marina, raio de sol em dias nublados.

*“O fator decisivo para vencer o maior obstáculo é, invariavelmente, ultrapassar o obstáculo anterior.”*

Henry Ford

## RESUMO

Este trabalho estudou numericamente o teor de umidade em um leito fixo de grãos de arroz durante o processo de secagem de grãos de arroz. O estudo considerou os seguintes parâmetros: temperatura e vazão do ar de secagem. O modelo matemático utilizado na literatura foi verificado baseado na influência das derivadas parciais de temperatura e umidade do ar de secagem em relação ao tempo; estes termos foram negligenciados em modelos matemáticos utilizados por outros pesquisadores. A temperatura e umidade absoluta do ar e do leito foram numericamente resolvidas para duas faixas do leito: 8-9 cm e 17-18 cm. O método numérico utilizado foi o método dos elementos finitos, no ambiente do *software* COMSOL Multiphysics. Os dados obtidos na simulação para umidade do leito foram comparados com dados experimentais obtidos na literatura, e validados por comparação. Como resultado, o modelo completo, utilizando as derivadas parciais da temperatura e umidade absoluta do ar, apresentaram maior precisão para regiões do leito localizados próximas à entrada de ar quente. Os resultados foram medidos usando o erro relativo e desvio padrão, resultando em uma melhora de até 23,51 % para erro relativo e 12,12 % para desvio padrão. Análises energéticas foram realizadas para os quatro casos estudados sendo que os casos que apresentaram menores temperaturas e vazão do ar de entrada obtiveram melhor performance, quando comparados com os demais: para uma temperatura do ar de entrada de 45 °C e vazão de 0,16 kg/m<sup>2</sup>.s, a máxima eficiência energética foi de 6 %/m<sup>2</sup>, enquanto que para uma temperatura de 50 °C e vazão de 0,22 kg/m<sup>2</sup>.s, a máxima foi de 4,2 %/m<sup>2</sup>. Já a análise exergética não apresentou uma tendência tão evidente de melhora, apesar de obter-se melhores resultados para maiores períodos de simulação com a redução da temperatura e vazão do ar de secagem. A otimização da secagem de arroz em leito fixo foi realizada com a técnica busca por coordenadas. As restrições foram obtidas pelas definições do modelo proposto: para que a secagem seja em leito fixo, a velocidade do ar não poderia exceder 1,7 m/s. Além disso, a utilização do ar de secagem muito quente pode danificar as características das sementes e, por isso, deve ser limitada: as secagens devem ocorrer entre 32 °C e 50 °C. A melhor velocidade do ar obtida foi de 0,19 m/s, enquanto que a temperatura inicial ótima do ar de secagem variou de acordo com os casos estudados: de 36,57 °C a 37,37 °C, dependendo do caso estudado.

**Palavras-chave:** Secagem de grãos. Simulação numérica. Estudo numérico. Equação diferencial parcial. Métodos numéricos.



## ABSTRACT

This work studied numerically the moisture content in a fixed bed of rice grains during the drying process of rice grains. The study considers the selected parameters: temperature and drying air leakage. The mathematical model filtered in the literature was based on the influence of the partial temperature derivatives and the drying air humidity in relation to the time; these terms for the mathematical models used by other researchers. Absolute air and bed temperature and humidity were numerically resolved for the bed ranges: 8-9 cm and 17-18 cm. The numerical method used was the finite improvement method, with no COMSOL Multiphysics software environment. Data obtained from bed collection simulation were compared with experimental data obtained from the literature and validated by comparison. As a result, a complete model, used as a partial derivative of temperature and absolute air humidity, reported as maximum accuracy for near hot inlet bed regions. Results are measured using relative error and standard deviation, resulting in a reduction of up to 23.51 % for relative error and 12.12 % for standard standard. Energy analyzes were used for the four cases studied, and the cases that are smaller and leak. will obtain the obtained inlet performance when compared to the following values: for an inlet temperature of 45 °C and a flow rate of 0.16  $kg/m^2.s$ , a maximum economic efficiency of 6  $\%/m^2$ , while for a temperature of 50 °C and flow rate of 0.22  $kg/m^2.s$ , the maximum was 4.2  $\%/m^2$ . An exergetic analysis, on the other hand, did not show such a low trend of improvement, despite obtaining better results for higher increase, with temperature reduction and air leakage. The optimization of fixed bed rice drying was performed with a coordinated spraying technique. As constraints were defined by the proposed model configurations: for drying in the fixed bed, the speed must not exceed 1.7  $m/s$ . In addition, the use of very hot drying air may damage the following characteristics and, therefore, this should be limited: as drying should occur between 32 °C and 50 °C. The best use speed was 0.19  $m/s$ , while the ideal drying temperature varied according to the studied cases: from 36.57 °C to 37.37 °C, depending on the case studied.

**Keywords:** Grain drying. Numerical simulation. Numerical study. Equation partial. Numerical methods.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área plantada, produção e produtividade de grãos de arroz ao longo de dez anos . . . . .	18
Figura 2 – Processo de secagem de grãos . . . . .	22
Figura 3 – Sentidos do fluxo de secagem . . . . .	24
Figura 4 – Leito estudado neste trabalho . . . . .	35
Figura 5 – Resíduo do nó intermediário $j$ de uma malha unidimensional . . . . .	43
Figura 6 – Região do gás de fluidização . . . . .	49
Figura 7 – Resultados obtidos com simulações para diferentes passos de tempo . . . . .	52
Figura 8 – Resultados obtidos com diferentes malhas para o caso 1, faixa do leito entre 8 e 9 cm . . . . .	53
Figura 9 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 1 . . . . .	55
Figura 10 – Confronto entre resultados numéricos obtidos por MEF e MDF: caso 1 . . . . .	58
Figura 11 – Análise da temperatura do leito ao longo do tempo . . . . .	60
Figura 12 – Análise da temperatura do leito ao longo do leito . . . . .	61
Figura 13 – Análise da umidade absoluta do ar ao longo do tempo . . . . .	62
Figura 14 – Análise da umidade absoluta do ar ao longo do leito . . . . .	63
Figura 15 – Análise da temperatura do ar ao longo do tempo . . . . .	64
Figura 16 – Análise da temperatura do ar ao longo do leito . . . . .	65
Figura 17 – Dcretização do leito para análises . . . . .	66
Figura 18 – Eficiência energética específica para os casos estudados . . . . .	66
Figura 19 – Eficiência exergética específica para os casos estudados . . . . .	68
Figura 20 – Eficiência exergética ótima para velocidades do ar fixas . . . . .	70
Figura 21 – Eficiência exergética ótima para velocidades do ar fixas . . . . .	72
Figura 22 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 1 . . . . .	73
Figura 23 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 2 . . . . .	73
Figura 24 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 3 . . . . .	74
Figura 25 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 4 . . . . .	74
Figura 26 – Parâmetros inseridos no modelo proposto por Zare <i>et al.</i> (2006) . . . . .	80
Figura 27 – Variáveis inseridos no modelo proposto por Zare <i>et al.</i> (2006) . . . . .	81
Figura 28 – Geometria definida . . . . .	81
Figura 29 – <i>Domain Probe</i> 1 do modelo de secagem de arroz . . . . .	82
Figura 30 – <i>Domain Probe</i> 2 do modelo de secagem de arroz . . . . .	83

Figura 31 – <i>Average</i> 1 do modelo de secagem de arroz . . . . .	84
Figura 32 – <i>Average</i> 2 do modelo de secagem de arroz . . . . .	85
Figura 33 – Passo no tempo definido para o modelo de secagem de arroz . . . .	86
Figura 34 – Tela inicial do aplicativo <i>online</i> de retirada de dados à partir de imagens	87
Figura 35 – Definição do tipo de gráfico a ser introduzido . . . . .	88
Figura 36 – Procedimentos para alinhar os eixos do gráfico carregado . . . . .	88
Figura 37 – Escolha dos pontos a serem definidos . . . . .	89
Figura 38 – Definição dos valores dos pontos escolhidos . . . . .	90
Figura 39 – Retirada dos dados presentes no gráfico . . . . .	90
Figura 40 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 2 . . . . .	104
Figura 41 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 3 . . . . .	105
Figura 42 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 4 . . . . .	106
Figura 43 – Confronto entre resultados obtidos por MEF e MDF: caso 2 . . . . .	107
Figura 44 – Confronto entre resultados obtidos por MEF e MDF: caso 3 . . . . .	108
Figura 45 – Confronto entre resultados obtidos por MEF e MDF: caso 4 . . . . .	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do ar e do grão contidas no trabalho de Zare <i>et al.</i> (2006)	39
Tabela 2 – Parâmetros do modelo matemático retirados de Zare <i>et al.</i> (2006)	39
Tabela 3 – Equações principais com suas C.C. e C.I. - modelo completo	40
Tabela 4 – Equações principais com suas C.C. e C.I. - modelo simplificado	41
Tabela 5 – Coeficientes a serem inseridos - modelo completo	44
Tabela 6 – Coeficientes a serem inseridos - modelo simplificado	45
Tabela 7 – Dados das malhas utilizadas	53
Tabela 8 – Diferença dos erros e MRD de cada malha, para o caso 1	54
Tabela 9 – Casos estudados	55
Tabela 10 – Erro máximo e desvio relativo médio de cada caso - modelos completo e simplificado	56
Tabela 11 – Erro máximo e desvio relativo médio de cada caso - comparação entre resultados obtidos por MEF e MDF	59
Tabela 12 – Eficiência energética específica para cada caso proposto	67
Tabela 13 – Eficiência exergética específica para cada caso proposto	68
Tabela 14 – Velocidades do ar testadas e suas temperaturas de entrada de ar quente ótimas	70
Tabela 15 – Temperaturas de entrada de ar quente testadas e suas velocidades do ar ótimas	71
Tabela 16 – Valores ótimos para as restrições, em cada caso	72
Tabela 17 – Valores simulados e otimizados de eficiência exergética - caso 1	75
Tabela 18 – Dados retirados para o caso 1 no intervalo de 8 e 9 cm	91
Tabela 19 – Dados retirados para o caso 1 no intervalo de 17 e 18 cm	92
Tabela 20 – Dados retirados para o caso 2 no intervalo de 8 e 9 cm	93
Tabela 21 – Dados retirados para o caso 2 no intervalo de 17 e 18 cm	94
Tabela 22 – Dados retirados para o caso 3 no intervalo de 8 e 9 cm	95
Tabela 23 – Dados retirados para o caso 3 no intervalo de 17 e 18 cm	96
Tabela 24 – Dados retirados para o caso 4 no intervalo de 8 e 9 cm	97
Tabela 25 – Dados retirados para o caso 4 no intervalo de 17 e 18 cm	98
Tabela 26 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 1, no intervalo entre 8 e 9 cm	99
Tabela 27 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 1, no intervalo entre 17 e 18 cm	100
Tabela 28 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 2, no intervalo entre 8 e 9 cm	100

Tabela 29 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 2, no intervalo entre 17 e 18 cm . . . . .	101
Tabela 30 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 3, no intervalo entre 8 e 9 cm . . . . .	101
Tabela 31 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 3, no intervalo entre 17 e 18 cm . . . . .	102
Tabela 32 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 4, no intervalo entre 8 e 9 cm . . . . .	102
Tabela 33 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 4, no intervalo entre 17 e 18 cm . . . . .	103

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
MDF	Método das diferenças finitas
MEF	Método dos elementos finitos
C.C.	Condições de contorno
C.I.	Condições iniciais
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Área superficial do leito ( $m^2/m^3$ )
$A$	Incógnita (adimensional)
$A_a$	Área da seção de entrada do ar de secagem ( $m^2$ )
$B$	Incógnita (adimensional)
$c$	Calor específico ( $J/kgK$ )
$C$	Incógnita (adimensional)
$\dot{E}$	Taxa de energia incorporada ( $W$ )
$\dot{E}X$	Taxa de exergia incorporada ( $W$ )
$G$	Fluxo de massa ( $kg/m^2s$ )
$h_{fg}$	Calor latente de vaporização ( $J/kg$ )
$\dot{m}$	Fluxo de massa de ar ( $kg/s$ )
$M$	Teor de umidade do leito (kg de água/kg de produto seco)
$P$	Pressão (Pa)
$r$	Raio equivalente ( $m$ )
$S_h$	Termo fonte ( $W/m^3$ )
$t$	Tempo (min)
$T$	Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ )
$UR$	Umidade relativa (adimensional)
$v$	Velocidade do ar (m/s)
$V$	Volume ( $m^3$ )
$x$	Profundidade do leito (m)
$X$	Incógnita (adimensional)
$y$	Largura do leito (m)
$Y$	Incógnita (adimensional)

$z$	Profundidade do leito (m)
$W$	Teor de umidade do ar (kg de água/kg de produto seco)

#### Letras gregas

$\epsilon$	Porosidade do leito (Volume de poros/volume total)
$\Theta$	Temperatura do leito ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\rho$	Massa específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\mu$	Viscosidade ( $\text{kg}/\text{ms}$ )
$\eta$	Eficiência

#### Subescritos

a	Ar
amb	Ambiente
e	Equíbrío
en	Energética
ex	Exergética
ex	Exergética
in	Na entrada
p	Produtos
pv	Parcial do vapor
sat	De saturação
v	Vapor
w	Água
0	Inicial



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1	O PROCESSO DE SECAGEM	22
2.2	TIPOS DE SECADORES	23
2.3	MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM DE GRÃOS	25
2.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
<b>2.4.1</b>	<b>Desenvolvimento dos modelos de secagem</b>	<b>25</b>
2.5	CONCLUSÃO	33
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>34</b>
3.1	MODELO MATEMÁTICO	34
<b>3.1.1</b>	<b>Problema físico</b>	<b>34</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Desenvolvimento do modelo matemático</b>	<b>35</b>
3.1.2.1	Desenvolvimento do modelo matemático simplificado	40
<b>3.1.3</b>	<b>Procedimento numérico</b>	<b>41</b>
3.1.3.1	O método dos elementos finitos	41
3.1.3.2	O MEF aplicado ao <i>software</i> COMSOL	42
3.1.3.3	Inserção das equações no COMSOL	43
3.2	ANÁLISES ENERGÉTICA E EXERGÉTICA	45
<b>3.2.1</b>	<b>Análise energética</b>	<b>45</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Análise exergética</b>	<b>47</b>
3.3	OTIMIZAÇÃO	48
<b>3.3.1</b>	<b>Definição da função objetivo</b>	<b>49</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Definição do conjunto de variáveis do projeto</b>	<b>49</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Definição do conjunto de restrições</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>51</b>
4.1	Verificação do modelo	51
<b>4.1.1</b>	<b>Definição do melhor passo no tempo</b>	<b>51</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Teste de malha</b>	<b>52</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Comparação entre os modelos completo e simplificado</b>	<b>54</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Comparação entre os resultados numéricos por elementos finitos e os resultados obtidos na literatura</b>	<b>57</b>
4.2	Análise da temperatura e umidade absoluta do ar e temperatura do leito	59
<b>4.2.1</b>	<b>Temperatura do leito</b>	<b>59</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Umidade absoluta do ar</b>	<b>61</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Temperatura do ar</b>	<b>63</b>
4.3	Análises energética e exergética	65

4.4	Otimização . . . . .	69
4.4.1	Otimização com temperatura do ar de secagem como restrição .	69
4.4.2	Otimização com velocidade do ar de entrada como restrição . .	71
4.4.3	Otimização com temperatura e velocidade do ar de secagem como restrições . . . . .	72
5	CONCLUSÃO . . . . .	76
	REFERÊNCIAS . . . . .	77
	APÊNDICE A – INSERÇÃO DO MODELO DE SECAGEM DE ARROZ EM LEITO FIXO NO <i>SOFTWARE</i> COMSOL . . . . .	80
	APÊNDICE B – RETIRADA DOS DADOS EXPERIMENTAIS DA LITERATURA	87
	APÊNDICE C – CÁLCULO DOS ERROS OBTIDOS COM CADA SIMULAÇÃO	99
	APÊNDICE D – GRÁFICOS: COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS COMPLETO E SIMPLIFICADO . . . . .	104
	APÊNDICE E – GRÁFICOS: CONFRONTO ENTRE RESULTADOS NUMÉRI- COS OBTIDOS POR MEF E MDF . . . . .	107

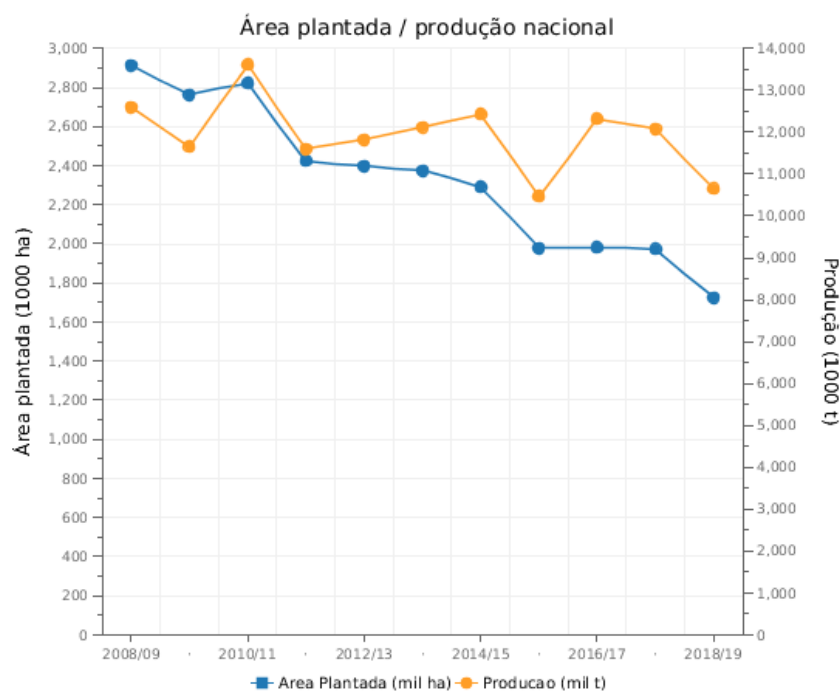
## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Bortolaia (2011), tem sido observado um alto crescimento populacional, corroborado por análises de estudos estatísticos. As projeções apontam que o crescimento se dará, principalmente, nos países subdesenvolvidos cuja agricultura é caracterizada pelos baixos índices de produtividade e altos índices de perda pós-colheita, agravando ainda mais os índices de fome no mundo.

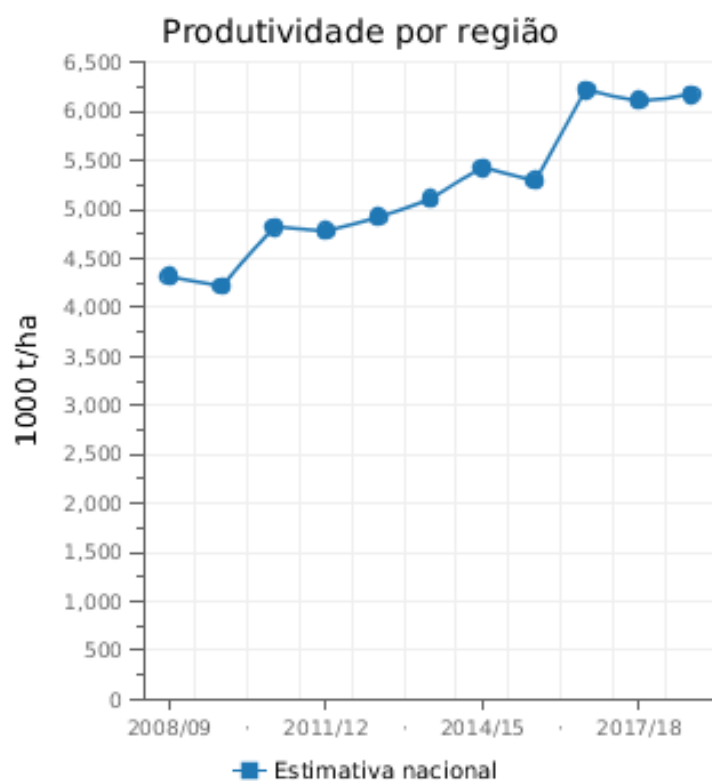
Bortolaia (2011) ainda evidencia a oportunidade de crescimento para o Brasil à partir da produção de alimentos e bioenergia, visto que o país possui áreas agricultáveis adequadas à produção de grãos, bem como condições favoráveis de clima, água e tecnologia. Os principais grãos produzidos pelo país são soja, milho, arroz, trigo e soja.

Segundo o Conab(2019), ao comparar a safra 2018/2019 com 2017/2018 de grãos arroz, foi observada uma queda da área plantada - de 1.725 mil hectares - e da produção - de 10.648 mil toneladas. Apesar da queda da produção, também foi constatado um aumento da produtividade de 6.173 kg/hectare conforme consta na figura 1.

**Figura 1 – Área plantada, produção e produtividade de grãos de arroz ao longo de dez anos**



**(a) Área plantada e produção de grãos de arroz**



**(b) Produtividade de grãos de arroz**

Fonte: Conab 2019

O aumento da produtividade de grãos de arroz relatada está diretamente relacio-

nada à melhora das técnicas de produção e conservação do grão.

Segundo Bortolaia (2011), a etapa da colheita leva usualmente em consideração o teor de umidade do grão, devendo ocorrer preferencialmente o mais próximo possível de sua maturidade fisiológica. Tal maturidade é o momento em que os grãos possuem maior qualidade do produto, ou seja, a maior qualidade de matéria seca.

Para Defendi (2015), embora a produção de grãos seja um processo periódico, sua demanda é ininterrupta. Desse modo, o processo de secagem torna-se de fundamental importância para o armazenamento e distribuição de um alimento de alta qualidade nutricional. Além disso, existem alguns fatores que prejudicam a qualidade dos grãos quando armazenados, tais quais: agentes físicos (temperatura, teor de umidade, danos mecânicos) ou agentes biológicos (microorganismos, insetos, fungos), sendo o teor de umidade o fator predominante que controla a qualidade do grão estocado.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Naghavi *et al.* (2010), o processo de secagem de grãos consome mais de 65 % do total de energia consumida na produção de grãos. Valente *et al.* (2012) atribuem o alto custo do processo de secagem de grãos ao aquecimento de ar, necessário para aumentar a qualidade do produto e prevenir perdas. Dessa forma, o controle do processo de secagem dos grãos está diretamente relacionado com redução de custos.

Os benefícios econômicos da secagem de grãos também são evidentes nas fases de plantio, colheita, armazenamento e distribuição. Segundo Ferrari Filho (2011), nas fases de plantio e colheita, por exemplo, há possibilidade de antecipação da colheita, reduzindo as perdas no campo ocasionadas por condições climáticas indesejadas e/ou ataque de pragas. A escolha de quando a colheita ocorrerá, juntamente com o aumento do período de estocagem, possibilita a obtenção de maiores preços para os produtos quando a comercialização ocorrer na entressafra. Nas fases de armazenamento e distribuição, pode-se aumentar o período de estocagem do produto, com conservação do mesmo, reduzir o custo devido à diminuição de peso e volume, formar estoques reguladores de mercado e, por fim, ofertar produtos de qualidade.

Frente à importância econômica do processo de secagem de grãos, seu controle, bem como o de seus parâmetros, é de extrema importância. Segundo Zare *et al.* (2006), o método mais rápido e barato de controlar os parâmetros do processo de secagem é a simulação computacional. Para Lopes *et al.* (2014), a simulação é uma importante ferramenta de otimização dos processos agrícolas, tendo como consequência a redução dos custos. Por isto, muitos modelos tem sido propostos e modificados para simular a secagem de grãos. A literatura ressalta a importância da modelagem computacional

no processo de secagem de grãos. Valente *et al.* (2012), por exemplo, afirmam que a utilização de modelos matemáticos é necessária para prever o teor de umidade final e da temperatura de saída do produto final. Assim, justifica-se a realização de um estudo de transferência de massa e calor, tendo como resultado um sistema de equações diferenciais parciais. Valente *et al.* (2012) ainda ressaltam que os resultados obtidos apresentam boa precisão, se comparados com dados experimentais da literatura porém, são específicos para cada tipo de processo.

MJ *et al.* (2016) afirmam que a modelagem contribui para o melhor entendimento da transferência de calor e massa e é muito útil para a melhoria no projeto de secadores e controle do processo de secagem. Malekjani e Jafari (2018) ressaltam que avanços na modelagem computacional e técnicas de simulação podem ajudar no desenvolvimento de novos secadores, modificação de sistemas atuais, economia de energia e otimização do processo.

Malekjani e Jafari (2018) ainda apontam as vantagens e desvantagens das simulações. Como vantagens tem-se a atuação no auxílio de sistemas de medição através da estimativa de parâmetros, tais quais umidade, velocidade, temperatura e outros de difícil localização, sensibilidade a pequenas mudanças e liberdade para testar diferentes e não usuais condições de secagem. Além disso, não é requerido grande espaço laboratorial, operadores qualificados e manutenção adicional. Como desvantagens tem-se a falta de dados adequados em relação às propriedades do material (especialmente aquelas que são dependentes de umidade e temperatura), baixo valor econômico de alguns produtos agrícolas o que torna a simulação irrelevante e escassez de pacotes de *software* amigáveis ao usuário.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar numericamente o processo de secagem de grãos de arroz em leito fixo utilizando o método numérico dos elementos finitos. O modelo matemático implementado foi baseado no trabalho de Zare *et al.* (2006). Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Modelar numericamente a secagem de grãos de arroz em leito fixo utilizando o módulo de matemática do *software* COMSOL;
- Validar os modelos numéricos utilizados confrontando os resultados obtidos com dados experimentais da literatura;
- Confrontar os resultados numéricos obtidos por elementos finitos com os resultados numéricos obtidos por Zare *et al.* (2006);

- Ampliar o estudo de secagem realizado por Zare *et al.* (2006) através de:
  - Comparar a importância do termo temporal nas equações diferenciais parciais referentes à temperatura do ar e à umidade absoluta do ar;
  - Analisar as eficiências energética e exergética dos modelos matemáticos utilizados na literatura.
  - Aplicar o método de Otimização de Busca por Coordenadas para encontrar o ponto ótimo de temperatura e fluxo de ar na entrada do secador;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

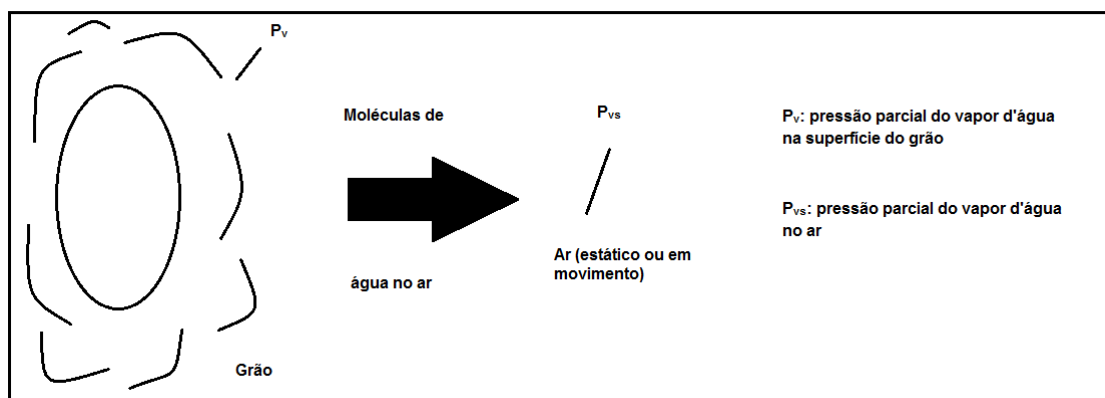
O tópico a seguir busca agregar embasamento teórico suficiente para o correto entendimento do modelo matemático e da técnica numérica utilizados.

### 2.1 O PROCESSO DE SECAGEM

Segundo Souza (1996), o processo de secagem, por definição, objetiva a retirada de água dos grãos por evaporação, até um nível que possibilite a armazenagem com conservação segura, inibindo o desenvolvimento de microorganismos. Durante este processo, ocorre transporte de água, nas formas de líquido e vapor, do interior para a superfície do grão e desta para o ar, por convecção.

Souza (1996) ainda ressalta que, fisicamente, ocorre elevação da pressão parcial de vapor d'água sobre a superfície do grão em relação à pressão parcial do vapor d'água no ar, como é mostrado na Figura 2. Se o grão está em equilíbrio higroscópico com o ar circundante, não há mais secagem, pois não há mais diferença de pressão parcial do vapor entre a superfície do grão e o ar.

**Figura 2 – Processo de secagem de grãos**



Fonte: Adaptado de Souza (1996)

Segundo Ferrari Filho (2011), a secagem de grãos pode ser realizada de duas maneiras: natural ou artificial. A secagem artificial pode ser realizada com altas ou baixas temperaturas. Seu mecanismo de funcionamento envolve a ventilação forçada de ar, promovida pela movimentação mecânica de ventiladores, com a utilização de diversos tipos de secadores por convecção. Sua principal vantagem é a preservação da qualidade do produto pois, o grão colhido com alto teor de umidade possui matéria seca de alta qualidade.



Ferrari Filho (2011) afirma que a secagem artificial com altas temperaturas é utilizada quando objetiva-se prevenir prováveis perdas e acelerar o processo. Embora traga muitos benefícios, a etapa de aquecimento eleva muito o custo financeiro do processo. Já a secagem artificial a baixas temperaturas torna o processo mais vantajoso, pois preserva mais as qualidades originais dos produtos e é o mais adequado para a secagem de sementes. Suas principais vantagens são: alta economia e eficiência, além da alta aplicabilidade em pequenas e médias propriedades, devido ao menor investimento inicial.

A secagem artificial pode ser realizada de modo estacionário (leito fixo) ou intermitente. Segundo Ferrari Filho (2011), na secagem artificial estacionária ou leito fixo, os grãos permanecem estáticos e apenas o ar se movimenta durante o processo. Suas principais vantagens são a pouco dano aos grãos e baixos investimentos, contrastando com as desvantagens: lentidão e não uniformidade de secagem. Segundo Ferrari Filho (2011), na secagem artificial intermitente os grãos são expostos a altas temperaturas na câmara de secagem por determinado tempo, intercalados com períodos em que não há circulação de ar na câmara de equalização ou repouso. Desse modo, ocorre a homogeneização da umidade pela imigração de água do interior para a superfície do grão, facilitando a evaporação e transferência da água para o ar no momento da passagem seguinte pela câmara de secagem, resfriando os grãos e permitindo o uso de temperaturas mais elevadas no ar de secagem. Suas principais vantagens são redução dos danos causados por trincamento, melhora no rendimento de grãos inteiros e a qualidade final do produto.

Por fim, Ferrari Filho (2011) define a secagem natural como sendo aquela que ocorre na própria planta, ainda em campo. É comumente utilizada quando há falta de capital disponível para infra estrutura de secagem. Apesar de econômica, é pouco segura, pois o produto fica exposto às condições ambientais desfavoráveis, a qualidade do produto decai, pois há consumo de parte das reservas da semente e, por fim, há possibilidade de ataque de pragas, contribuindo para sua deterioração.

## 2.2 TIPOS DE SECADORES

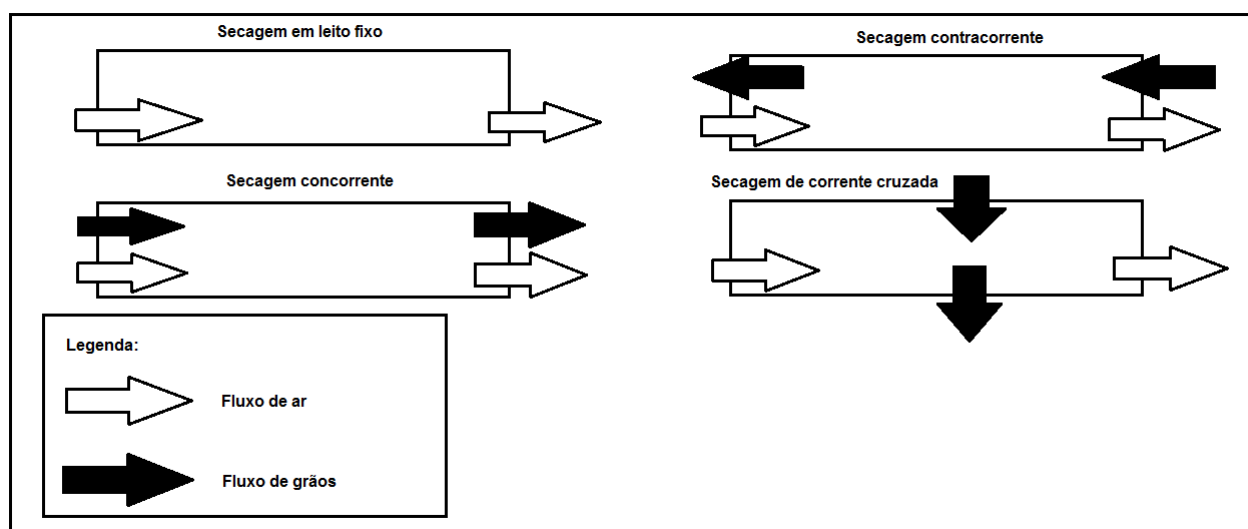
O fator que pode influenciar muito a qualidade do grão obtido é o sistema de secagem empregado. Segundo Bortolaia (2011), é importante que se conheça os principais tipos de secadores disponíveis, e sua classificação:

- Sistema de carga/funcionamento:
  1. Intermitentes: o produto passa mais de uma vez pela torre de secagem, ocorrendo a recirculação do produto;

2. Contínuos: o produto passa uma única vez pela torre de secagem para atingir o teor de secagem necessário.
- Forma de movimentação do ar:
    1. Secadores com insuflação;
    2. Secadores com exaustão de ar.
  - Sentido do fluxo de secagem:
    1. Secagem em leito fixo: o ar avança sobre o leito fixo de grãos no interior do secador;
    2. Secagem concorrente: o ar e o grão avançam paralelamente, no mesmo sentido, no interior do secador;
    3. Secagem contracorrente: o ar e o grão avançam paralelamente, mas em sentidos opostos, no interior do secador;
    4. Secagem de corrente cruzada: o ar avança perpendicularmente no sentido do escoamento do grão;
    5. Secagem com escoamento misto: o processo é composto de escoamento cruzado, concorrente e contracorrente. Secadores de escoamento misto são mais caros devido à maior complexidade do equipamento que requer maior custo de fabricação e manutenção.

Os sentidos do fluxo de secagem são mostrados na Figura 3:

**Figura 3 – Sentidos do fluxo de secagem**



## 2.3 MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM DE GRÃOS

A modelagem do processo de secagem de grãos objetiva prever o teor de umidade e a temperatura de saída tanto do ar de secagem quanto do produto final. Para tal, é realizado um estudo de transferência de massa e calor, sendo que deve haver uma equação empírica específica para cada tipo de situação estudada. Como resultado, obtém-se a redução do custo de construção e aperfeiçoamento de protótipos de secadores.

O modelo matemático determina os parâmetros que permitem otimizar a eficiência do sistema, por meio de monitoramento e controle do processo através de um processo interativo.

A equação de secagem de um único grão pode ser obtida por modelos empíricos ou por modelos baseados na teoria de difusão, sendo as empíricas mais utilizadas pelos pesquisadores, pois proporciona economia de tempo de processamento computacional. Entretanto, há uma pequena perda da precisão do resultado obtido ao final do estudo conforme os estudos de Valente *et al.* (2012), Souza (1996), Zare *et al.* (2006) e ElGamal *et al.* (2013).

## 2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tópico a seguir traz um resumo de trabalhos desenvolvidos por outros autores sobre secagem de grãos em leito fixo.

### 2.4.1 Desenvolvimento dos modelos de secagem

Um modelo computacional baseado no balanço de massa e energia foi desenvolvido por Dubey e Pryor (1996), considerando-se a secagem de grãos de arroz em casca com utilização de energia solar, quando o ar de secagem é aquecido utilizando-se coletores solares sob estado estacionário na forma de placas planas. O modelo de secagem desenvolvido utilizou o modelo de camadas finas: o leito profundo foi considerado como uma série de camadas finas posicionadas normal à direção do fluxo. Este modelo foi escolhido por ser acessível e requerer iterações diretas. O objetivo dos autores foi auxiliar no entendimento da complexidade do processo, tornando o modelo uma ferramenta na tomada de decisão e na avaliação adequada das opções de projeto do coletor a fim de atender aos requisitos de secagem. Tanto o coletor solar quanto os modelos computacionais foram validados separadamente com seus respectivos resultados. Por fim, um sistema experimental foi construído para validar o modelo.

O modelo proposto por Rumsey e Rovedo (2001) é para um secador de trigo bidimensional de fluxo misto. Os autores utilizaram o método das diferenças finitas

com abordagem explícita, estudando as mudanças da taxa de umidade do produto na entrada, temperatura do ar de secagem e fluxo de grãos, obtendo convergência satisfatória com os dados experimentais obtidos na literatura. Os gráficos obtidos para a distribuição da umidade do leito são relativos ao regime transiente no período transitório inicial após o início do processo de secagem e para o estado permanente. Desse modo, os autores concluíram que a distribuição da umidade mostrou boa concordância com o modelo de estado estacionário e fluxo cruzado. Por fim, o modelo provou se útil para examinar os efeitos de manipulações da temperatura do ar de secagem e fluxo de grãos.

O modelo desenvolvido por Srivastava e John (2002) foi o de leito profundo, onde o calor é retirado por convecção e existe gradiente de temperatura e umidade, sendo que estes gradientes variam em função da posição do leito e do tempo. O modelo adotado é o do não-equilíbrio, pois não existe equilíbrio de massa e calor, com os parâmetros variando de acordo com a posição do leito e o período de secagem. As equações utilizadas foram as de balanço de energia do ar, balanço de energia no grão, balanço de umidade e, por fim, equação de secagem em camada fina, de acordo com o modelo de Thompson. O procedimento numérico de Runge Kutta foi utilizado para a resolução das equações na forma matricial. Os autores concluíram que mais umidade do grão é vaporizada quando a espessura do leito aumenta. Além disso, a porosidade do leito não tem muito efeito como a temperatura do ar.

Borges (2002) propôs um modelo composto por um sistema de quatro equações diferenciais parciais, que relacionam o teor de umidade e a temperatura dos grãos e do ar. O modelo simula o processo de secagem para diferentes valores das variáveis temperatura, velocidade do ar de secagem, velocidade e teor de umidade inicial dos grãos. O modelo foi inicialmente desenvolvido em leito fixo e adaptado para secagem em fluxo contínuo, de acordo com as características do secador tipo torre, mediante algumas simplificações. Para validar o modelo em altas temperaturas, foram realizados experimentos em camadas finas para o intervalo de temperatura entre 60 °C e 110 °C e diferentes velocidades de ar. Pôde-se observar discordâncias significativas para temperaturas elevadas, superiores a 110 °C, para um grande tempo de secagem. Simulando a secagem com modelo de leito profundo e comparando os resultados da primeira camada com os dados experimentais da camada fina, observou-se que o modelo descreve bem o processo de secagem de grãos nas condições consideradas com relação aos valores do teor de umidade dos grãos e temperatura do ar.

Istadi e Sitompul (2002) lidaram com a compreensão matemática e modelagem numérica da secagem em leito profundo de grãos de milho, com a validação do modelo por trabalhos experimentais. O modelo transiente bidimensional de transferência de calor e massa considera mecanismos convectivos e difusivos, enquanto o modelo

transiente unidimensional considera transferência de calor e massa dentro da partícula. Os modelos desenvolvidos contém equações para o momentum - resolvida pelo método das diferenças finitas (MDF) utilizando o método semi-implícito para equações de pressão - e para energia e massa do grão e ar de secagem - resolvidas pelo MDF utilizando algoritmo implícito de direção alternada. Os modelos são aplicados de acordo com o secador projetado e desenvolvido a fim de simular os perfis de umidade e temperatura tanto para o ar de secagem quanto para o leito. Os resultados obtidos com as simulações mostraram que os modelos podem ser usados para prever umidade média do leito com o tempo em uma coluna de largo diâmetro, perfil de temperatura do leito em função do tempo, temperatura e umidade relativa do ar de secagem ao longo de cada posição da coluna, além da velocidade superficial e distribuição do campo de pressão sobre o leito.

Fregolente *et al.* (2004) estimaram os parâmetros térmicos efetivos ao final da secagem, quando o teor de umidade de diversos grãos alcançam valores de equilíbrio, ou seja, há apenas transferência de calor em regime permanente. Nestas condições, o leito possui um teor de umidade constante e a estimativa dos parâmetros térmicos efetivos pode ser efetuada a partir do ajuste de um modelo pseudo-homogêneo bidimensional estático à várias medidas de temperatura no leito de grãos no final da secagem. O parâmetro temperatura foi utilizado para validar o modelo: foram obtidos desvios inferiores a 7 % para a grande maioria das temperaturas calculadas pelo modelo matemático em relação às temperaturas experimentais. Os resultados indicam que a metodologia utilizada para estimativa da condutividade térmica efetiva radial e do coeficiente efetivo de transferência de calor parede-leito foi adequada. Além disso, constatou-se que a soja é o grão que apresenta os menores valores de condutividade efetiva radial, enquanto que o trigo apresenta o maior valor do coeficiente de transferência de calor parede-leito.

Zare *et al.* (2006) desenvolveram um programa computacional na linguagem FORTRAN, onde implementaram o método das diferenças finitas para estudar o processo de secagem de arroz em casca em um secador estacionário de leito profundo. O modelo matemático utilizado foi o de não equilíbrio com equações diferenciais parciais, obtidas pelo balanço de massa e calor, além de equações empíricas apropriadas para camadas finas. A validação do modelo foi feita por comparação com os resultados obtidos com a secagem de arroz em escala laboratorial sob várias condições - com todos os valores de desvio relativo médio abaixo de 9 % -, principalmente com alterações na temperatura do ar de secagem e vazão mássica.

Rodrigues *et al.* (2008) validaram o modelo de Thompson para secagem de abacaxi em leito fixo com aquecimento do ar por resistências elétricas, realizando a comparação entre os resultados simulados e os experimentais. Como resultado, o modelo de Thompson mostrou-se viável, com precisão satisfatória - avaliada pelo

erro relativo médio variando de 2,62 e 11,33 % e pelos coeficientes de determinação próximos de 0,99 -, validando a simulação.

Hemis *et al.* (2009) estudaram a secagem de trigo em camadas finas e leito fixo, com a caracterização do processo pelo fluxo de massa evaporada. O experimento realizado apresentou uma faixa da temperatura de secagem de 40-60 °C, umidade relativa de 10-30 %, velocidade do ar de 0,7 m/s e umidade inicial dos grãos de 26-31 %. Um modelo de equilíbrio para camada profunda estacionária com ar de secagem com movimentação vertical ascendente foi desenvolvido, utilizando o balanço de massa e energia entre grãos. O modelo desenvolvido foi validado por secagem de grãos de trigo em secador de laboratório, utilizando diferentes temperaturas do ar de secagem e conteúdo inicial de umidade.

Corrêa *et al.* (2011) estudaram e modelaram o processo de secagem de milho em espiga para diferentes condições de temperatura do ar, além de determinar algumas relações termodinâmicas associadas à secagem das sementes, para a faixa de temperatura utilizada. Utilizaram-se espigas de milho com teor de umidade inicial de 0,45 (kg de água/kg de produto seco), que foram secas até um teor de água final de 0,12 (kg de água/kg de produto seco), nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C. Os dados observados ajustaram-se para diferentes modelos tradicionalmente utilizados para descrever o processo, sendo o logarítmico o que melhor se ajustou. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura:  $5,490 \times 10^{-10}$ ,  $7,597 \times 10^{-10}$  e  $1,163 \times 10^{-9} m^2/s$ , para temperaturas de 45, 55 e 65 °C, respectivamente. Com base na dependência da constante de secagem do modelo utilizado com a temperatura, Corrêa *et al.* (2011) determinaram alguns parâmetros termodinâmicos, a partir do qual foi possível verificar que a variação da energia cinética de secagem é dependente das contribuições de energia do meio.

Em seu trabalho, Valente *et al.* (2012) utilizaram o modelo de Thompson, para simular a secagem de grãos a altas temperaturas, utilizando o LINSEC, software de simulação graficamente orientado. Este programa se apresenta na estrutura de blocos organizados, permitindo modelagem e simulação de diversos tipos de secagem. Os blocos utilizados estão relacionados com o ar, produtos e secadores, sendo que cada bloco representa uma parte específica do sistema de secagem. LINSEC se mostrou eficiente para modelar e simular sistemas de secagem, fornecendo valores próximos da realidade - as diferenças absolutas média e máxima entre a umidade simulada e experimental foram de 1,05 % wb e 1,63 % wb, respectivamente; as diferenças absolutas média e máxima entre as águas evaporadas simuladas e experimentais foram de 1,18 e 1,78 %, respectivamente. As principais vantagens do *software* foram a alta flexibilidade e facilidade de manuseio durante a modelagem de diversos tipos de secadores.

ElGamal *et al.* (2013) utilizaram simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para prever coeficientes convectivos de transferência de calor e massa num leito profundo de arroz, em função do fluxo de ar de secagem. Assim, estudaram a secagem de finas camadas com transferência volumétrica de massa e calor em um leito profundo, assumindo que não há equilíbrio térmico entre o ar de secagem e os grãos. O estudo foi feito no ambiente do *software* COMSOL, com a utilização do método dos elementos finitos, a fim de prever a temperatura do ar, taxa de umidade dos grãos e a temperatura em diferentes localidades do leito durante o processo de secagem. Ao final do trabalho, as predições teóricas para o perfil de umidade - variando de 1,0 a 3,13 %, para todos os ensaios - e temperatura no interior do leito profundo de arroz foram validadas com boa convergência por dados experimentais contidos na literatura.

Balbay *et al.* (2013) investigaram a secagem de grãos de pistache em um leito fixo. Foi realizado um experimento com ar aquecido incidindo em amostras de pistache (30 gramas), à diferentes temperaturas do ar de secagem (40, 60 e 80 °C) e velocidades de ar (0,5, 0,075 e 0,1 m/s). O procedimento durou 7 horas, sendo que de 20 em 20 minutos foram realizadas medições das temperaturas internas e externas, umidade relativa do ar, velocidade e perda de massa. Por fim, comparou-se os modelos de Newton, Page, Henderson e Pabis, logaritmo, de dois termos, Wang e Singh e Midilli e Kucuk, sendo que os dois últimos foram os que apresentaram melhor desempenho para o experimento dado, com coeficiente de determinação, soma do erro e raiz quadrada média do erro variando de 0,9997 a 0,9998, 0,0001703 a 0,0004206 e 0,0033767 a 0,006024, respectivamente.

Oko e Nnamchi (2013) analisaram o processo de transferência de calor e massa de um secador solar de grãos de leito fixo para secagem de grãos de milho, localizado na Nigéria. Foram feitas medições de umidade do leito e do ar, além de temperatura do leito e do ar. O processo foi modelado matematicamente por um conjunto de equações diferenciais parciais que determinaram as grandezas relativas a umidades e temperaturas do leito e do ar em função do tempo e do espaço, espaço e outros parâmetros do modelo (números de Biot e Posnov e condições iniciais). O MDF é utilizado para encontrar umidades e temperaturas do leito e do ar. Os resultados são validados com os dados experimentais, com o valor do coeficiente de determinação entre 0.9826 e 0.9833. A aproximação entre dados experimentais e numéricos é boa somente para específicos números de Biot (120 e 0.006) e Posnov (1). Além disso, foi constatado que grandes taxas de transferência de calor e massa, e o equilíbrio antecipado de temperatura e umidade do ar, são obtidos para altos números de Biot, baixos números de Posnov e baixas temperaturas e umidades do ar de secagem iniciais. Os resultados podem ser usados como parâmetros específicos de projeto ótimo para secadores de grão solar.

Amantéa *et al.* (2013) apresentam uma metodologia original para otimização de secadores baseados na eficiência energética e exergética e parâmetros operacionais controláveis: velocidade do ar de secagem e temperatura. Esta metodologia é baseada em uma nova abordagem para a análise da eficiência de secagem de modelos transientes baseados na primeira e segunda leis da termodinâmica. É desenvolvido um esquema numérico sem malha, baseado em funções de base radial cúbica e quadrática para resolver um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas com dominância advectiva. Os resultados de simulação mostraram excelente precisão quando comparados com os dados disponíveis na literatura.

Em seu trabalho, Lopes *et al.* (2014) compararam o modelo logarítmico de Hukill e o de equilíbrio de Thorpe com os resultados empíricos encontrados na literatura. Os parâmetros utilizados foram temperatura de secagem, a taxa de umidade e o tempo de secagem de grãos de milho. Os dois modelos apresentaram bom desempenho mas, o modelo de Thorpe foi ligeiramente melhor. Este modelo é aplicado ao longo de situações de secagem mais diversificadas, fornecendo um melhor entendimento do processo de secagem. Entretanto, as vantagens do modelo logarítmico dizem respeito à simplicidade e rapidez de solução.

Defendi *et al.* (2015) utilizaram o modelo de secagem em leito fixo heterogêneo em duas fases, o qual considera o ar e o grão como duas fases distintas. Assim, há uma temperatura e umidade específica tanto para o grão quanto para o ar em um dado tempo e numa dada posição do leito. Matematicamente, o problema é resolvido através de quatro equações diferenciais parciais, considerando-se duas formas de secagem distintas: a convencional e a periódica. As simulações foram realizadas para casos que demandaram o mesmo consumo energético e, como resultado, concluiu-se que a secagem periódica apresentou níveis de umidade do grão menores em comparação com a convencional para o mesmo tempo.

Ranjbaran *et al.* (2014) aplicaram a técnica CFD tridimensionalmente, com a utilização do *software* Fluent, para simular a secagem de arroz em um secador de leito profundo. Os parâmetros de secagem previstos foram comparados com os dados experimentais. Os valores de desvio relativo médio, erro padrão de previsão e máximo erro de previsão para a simulação de umidade do grão, temperatura do grão e umidade relativa tiveram razoável precisão, com valores de 6, 10 e 9 %; 0,33 % (d.b), 1,24 °C e 0,06 % (kg/kg de ar seco); e 2,25 % (d.b), 6,8 °C e 0,37 % (kg/kg de ar seco), respectivamente. O desempenho energético e exergético foram simulados e analisados, sendo identificado que este é aumentado com o aumento da temperatura do ar de entrada e redução da vazão de ar. Entretanto, o risco de degradação da qualidade do grão deve ser levado em conta durante a escolha da temperatura do ar de entrada e sua vazão mássica.



Mohan e Talukdar (2014) construíram uma instalação experimental para examinar as características da secagem convectiva do objeto úmido retangular (fatia de batata com dimensões de 4 cm x 2 cm x 2 cm), constituída de: uma seção de entrada, uma seção convergente e outra divergente, uma câmara de configuração, uma seção de teste e uma seção de saída. O experimento teve duração de 16 horas e foram realizadas medições para umidades do leito inicial (83 % em termos de massa e 90 % em termos de volume) e tempo-dependente para diferentes temperaturas do ar (40 °C, 50 °C, 60 °C e 70 °C) e velocidade do ar de 2 m/s. Como resultados foram determinados densidade da fatia de batata, sendo a máxima encontrada de 1,34 g/cm<sup>3</sup>. Foi constatado que: a redução do volume durante a secagem é quase linear com a umidade do leito (74,13 % e 81,56 % para temperaturas de secagem de 40 °C e 70 °C, respectivamente); a percentagem da porosidade aumenta com a redução da umidade do leito e o aumento da temperatura do ar de secagem. Além disso, volumes de água, ar e sólido são determinados para diferentes temperaturas. Os resultados foram validados com dados teóricos.

Jokiniemi e Ahokas (2014) examinaram as abordagens de economia de energia, alcançadas pelo uso de elevada temperatura do ar de secagem e pela manipulação da vazão volumétrica em escala reduzida em um secador de fluxo cruzado, para secagem de trigo e aveia. Este é composto por 4 células de secagem de fluxo misto mas, somente 2 delas foram usadas enquanto as outras duas foram usadas como espaço de armazenamento. O fluxo volumétrico de ar foi gradualmente reduzido ao longo do processo de secagem e a temperatura do ar de secagem foi aumentada. A umidade relativa do ar de exaustão foi usada como fator de controle para ajustar a vazão volumétrica. Os resultados indicam que controlar a temperatura e a vazão volumétrica durante o processo de secagem em um secador de fluxo misto tem potencial de melhorar a eficiência energética e desempenho do secador. Os resultados mostraram economias de 5 % para secagem de cevada (com aumento na taxa de evaporação de 5 %) e 14 % para secagem de aveia (com aumento na taxa de evaporação de 17 %). Contudo, alguma degradação da viabilidade do grão foi observada, especialmente na aveia, enquanto não foi observado nenhum dano para a cevada, mesmo quando as temperaturas dos grãos se mantiveram mais altas do que da aveia. Outras pesquisas são necessárias para encontrar parâmetros de controle e limites de temperatura para cada espécie de cereal.

Souza *et al.* (2015) avaliaram a secagem de grãos de soja em um secador de leito fixo, considerando a heterogeneidade do processo e os efeitos das variáveis do processo na qualidade da semente. Temperatura das sementes e do ar, umidade da semente e qualidade da semente são medidas ao longo do leito. A metodologia desenvolvida foi adequada para estudar a heterogeneidade do processo e para ana-

lisar os efeitos agrupados de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar na qualidade final das sementes secadas. Uma técnica estática é usada para obter equações empíricas que relacionam indicadores da qualidade da semente, a várias posições do leito em função das variáveis do processo. Estas equações são usadas para prever as condições de secagem em que os índices de qualidade da semente são comercialmente aceitáveis. O melhor índice de germinação e índice de vigor são obtidos a baixa temperatura do ar (menor que 35 °C) juntamente com baixa umidade relativa (menor que 35 %). Além disso, alta umidade relativa do ar (maior que 35 %) e baixa temperatura do leito assegura melhores qualidades físicas, expressas pelo alto índice de sementes não fissuradas.

MJ *et al.* (2016) estudaram a perda de umidade e a variação na taxa de secagem com o tempo durante a secagem de sementes de colza em camadas finas com ar quente, por meio de experimentos. Além disso, a perda de umidade da semente, bem como a distribuição do fluxo de ar na câmara de secagem é simulada e analisada no *software* FLUENT, usando o método CFD. Para modelar a transferência de calor e massa, é incorporado um código usando *User-Defined Functions* e *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*. Através da simulação conclui-se que não há taxa de secagem constante, pois a transferência de umidade ocorre principalmente nos estágios iniciais, e a taxa de secagem diminui ao longo do processo. Os resultados numéricos são comparados com os dados experimentais e tem boa concordância, com erros relativos de umidade, temperatura do ar e velocidade modelo de 7,48 %, 1,07 % e 7,72 %, respectivamente.

ElGamal *et al.* (2017) examinaram o potencial de técnicas de imagem térmicas, para validar simulações CFD de modelos desenvolvidos, para descrever o processo de secagem de arroz em leito profundo e visualizar perfis de velocidade ao longo do leito em diferentes condições de secagem. Um secador laboratorial de ar forçado foi projetado e fabricado e imagens térmicas do arroz dentro do secador foram diretamente adquiridas durante o processo, para diferentes temperatura do ar (50 e 60 °C) e velocidade do ar de entrada (0,1 e 0,2 m/s). Os dados fornecidos pelos modelos CFD para distribuições de umidade e temperatura e umidade ao longo do leito foram confrontados com os dados experimentais, com coeficiente de determinação de 0,96. Além disso, verificou-se boa predição para temperatura do leito do secador de leito profundo, com coeficientes de determinação maior que 0,90 e baixo erro quadrático médio (menor que 5 °C). Uma boa aproximação também foi encontrada entre os valores de temperatura gravados pelos termopares e aqueles exportados das imagens térmicas, com coeficiente de determinação de 0,94.

## 2.5 CONCLUSÃO

A partir da revisão da literatura, algumas interpretações são apresentadas:

- Os modelos empíricos para a secagem de um único grão são os mais utilizados pelos pesquisadores, pois proporciona economia de tempo de processamento computacional;
- Modelos empíricos apresentam uma pequena perda da precisão do resultado obtido ao final do estudo, conforme os estudos de Valente *et al.* (2012), Souza (1996), Zare *et al.* (2006) e ElGamal *et al.* (2017);
- Baixas temperaturas de secagem são recomendadas para a maioria dos produtos agrícolas, sendo que 15 - 20 °C é suficiente para atingir os parâmetros de secagem adequado - (DUBEY; PRYOR, 1996);
- A secagem de grãos que utiliza o ar aquecido apresenta maior rapidez no processo, aumentando a validade do produto e prevenindo perdas mas, pode causar descoloração, fissuras e rachaduras no grãos;
- O modelo de Thompson é bastante utilizado na literatura - Valente *et al.* (2012) e Souza (1996) - por exigir baixa potência computacional e fornecer uma boa aproximação das variáveis de saída;
- Técnicas CFD estão substituindo outros métodos numéricos, tais quais o método das diferenças finitas (MDF) - para a resolução das equações da modelagem de secagem de grãos - Malekjani e Jafari (2018) e ElGamal *et al.* (2017).

### 3 DESENVOLVIMENTO

Este tópico aborda o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente o modelo matemático adotado para descrever numericamente a secagem de grãos de arroz em leito fixo é apresentado, seguido do método numérico utilizado para resolvê-lo e da forma de inserção das equações no módulo de matemática do *software* COMSOL. Por fim, as análises energética e exergética foram descritas, juntamente com a técnica de otimização empregada e suas restrições.

#### 3.1 MODELO MATEMÁTICO

Este item apresenta o modelo matemático utilizado por Zare *et al.* 2006, no qual este trabalho é baseado.

##### 3.1.1 Problema físico

As hipóteses adotadas por Zare *et al.* (2006) para o desenvolvimento do modelo presente neste trabalho são:

1. A contração volumétrica do leito de grãos é desprezada durante o processo de secagem;
2. Os gradientes de temperatura no interior das sementes individuais são desprezíveis;
3. A transferência de massa e calor por condução entre os grãos é negligenciada;
4. As variações temporais de temperatura e umidade do ar foram consideradas desprezíveis em relação às suas variações ao longo da espessura da camada de grãos;
5. As paredes do secador são adiabáticas, com capacidade térmica desprezível;
6. Durante qualquer pequeno intervalo de tempo, a capacidade térmica da umidade do ar e do grão são constantes.

Neste trabalho foi realizada a comparação do modelo onde os termos referentes às variações temporais de temperatura e umidade do ar foram negligenciados (simplificado) do modelo onde os termos foram considerados (completo).

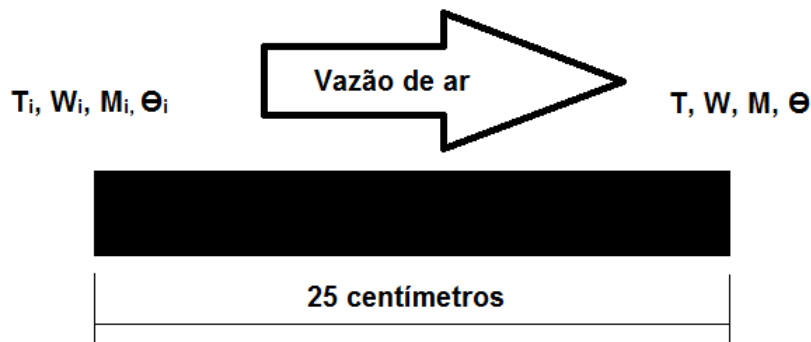
Segundo Zare *et al.* (2006), o método mais rápido de menor custo para controlar as dinâmicas do processo de secagem é a simulação computacional. Vários modelos

foram desenvolvidos para secagem de arroz em camada fina entretanto, modelos de simulação que descrevem a secagem de arroz em camada espessa são mais raros.

O modelo de secagem de arroz proposto por Zare *et al.* (2006) é de camada espessa, do tipo equações diferenciais parciais (EDPs), por ser mais detalhado, preciso e válido para secagem de cereais.

No presente trabalho foi realizado um estudo do escoamento unidimensional onde os efeitos de borda são considerados desprezíveis, conforme apresentado na figura 4. Considerou-se que o grão estava em equilíbrio térmico e higroscópico com o ambiente, no início do processo de secagem.

**Figura 4 – Leito estudado neste trabalho**



Fonte: Desenvolvido pela autora

### 3.1.2 Desenvolvimento do modelo matemático

O modelo de secagem de arroz desenvolvido por Zare *et al.* (2006) consiste em um sistema de EDPs, que devem ser implementadas simultaneamente. Para a obtenção deste conjunto, deve-se realizar os balanços de massa e energia tanto para o ar de secagem quanto para o leito do grão.

O balanço de massa do sistema fornece a equação (1):

$$G \frac{\partial W}{\partial x} = -\rho_p \frac{\partial M}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial W}{\partial t} \quad (1)$$

onde:

$W$  = umidade absoluta do ar (kg de água/kg de ar seco)

$x$  = posição no leito (m)

$G$  = fluxo de massa ( $kg/m^2s$ )

$\rho_p$  = densidade do produto ( $kg/m^3$ )

$M$  = umidade do leito (kg de água/kg de produto seco)

$t$  = tempo (min)

$\epsilon$  = razão de vazios (decimal)

A densidade do grão utilizada neste trabalho variou de acordo com a umidade do grão, conforme medido por Fan *et al.* (1998):

$$\rho_p = 4,44M + 504,7 \quad (2)$$

Nota-se aqui que a temperatura do ar para o modelo de secagem de grãos de arroz é expresso na unidade graus Celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Desse modo, para obter-se a temperatura absoluta do ar deve-se utilizar a equação (3):

$$T_{abs} = T + 273,15 \quad (3)$$

onde:

$T_{abs}$  = temperatura absoluta do ar (K)

O balanço de energia para o ar, por sua vez, fornece a relação expressa por (4):

$$G(c_a + c_v W) \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_p c_v (T - \theta) \frac{\partial M}{\partial t} - h_p (T - \theta) - \rho_a \epsilon (c_a + c_v W) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

onde:

$c_a$  = calor específico do ar ( $J/kgK$ )

$c_v$  = calor específico do vapor d'água ( $J/kgK$ )

$T$  = temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta$  = temperatura do leito ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h_p$  = coeficiente de transferência de calor do grão ( $J/m^2 K s$ )

$\rho_a$  = densidade do ar ( $kg/m^3$ )

Por fim, o balanço de energia para o grão resulta em:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_p (c_p + c_w M)} \left[ h_p (T - \theta) + h_{fg} \rho_p \frac{\partial M}{\partial t} \right] \quad (5)$$

onde:

$c_p$  = calor específico dos grãos ( $J/kgK$ )

$c_w$  = calor específico da água ( $J/kgK$ )

$h_{fg}$  = calor latente de vaporização ( $J/kg$ )

A equação diferencial para o teor de umidade do leito é obtida da razão de umidade da seguinte maneira:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_{in} - M_e} \quad (6)$$

onde:

MR = relação de umidade

$M_e$  = umidade no equilíbrio

$M_{in}$  = umidade inicial.

Sendo que a umidade de equilíbrio para o produto foi obtida experimentalmente por Zare *et al.* (2006) e a seguinte forma:

$$M_e = 0,001 \left( \frac{A}{B} \right)^C \quad (7)$$

onde:

A, B e C são adimensionais.

Os adimensionais são expressos por:

$$A = -\ln(1 - UR)T_{abs} \quad (8)$$

$$B = 2,667 \times 10^{-7} \left( 1 - \frac{T_{abs}}{641,7} \right)^{-23,438} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{4,0 \times 10^5 T_{abs}^{-2,1166}} \quad (10)$$

Onde:

UR = umidade relativa do ar.

Zare *et al.* (2006) ainda recorre à relação de umidade empírica definida por Wang e Singh (1978) para obter a relação de umidade como:

$$MR = \exp(-Xt^Y) \quad (11)$$

Para a determinação do adimensional X foi utilizada a equação descrita por Brooker *et al.* (1992):

$$X = 0,01579 + 0,0001746T - 0,01413UR \quad (12)$$

onde:

UR = umidade relativa (decimal)

O adimensional Y pode ser descrito como:

$$Y = 0,6545 + 0,002425T + 0,078867UR \quad (13)$$

A fim de obter a equação do teor de umidade do leito, Zare *et al.* (2006) igualou as equações (6) e (11), e obteve a equação (14):

$$M = (M_{in} - M_e)exp(-Xt^Y) + M_e \quad (14)$$

Como o modelo desenvolvido necessita da diferencial parcial da umidade do leito em relação ao tempo, faz-se necessário realizar a integração da equação (14):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial UR} \cdot \frac{\partial UR}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial UR} \cdot \frac{\partial UR}{\partial t} + \frac{dM}{dt} \quad (15)$$

A fim de simplificar os cálculos, para pequenos passos no tempo,  $\frac{\partial T}{\partial t}$  e  $\frac{\partial UR}{\partial t}$  tendem a zero. Assim, a equação (15) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{dM}{dt} \quad (16)$$

Aplicando estas considerações na integração da equação (14), obtém-se:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (M_{in} - M_e) \cdot (-Xt^Y)exp(-Xt^Y) \quad (17)$$

Manipulando algebricamente a equação (14), pode-se reescrevê-la como:

$$M - M_e = (M_{in} - M_e) \cdot exp(-Xt^Y) \quad (18)$$

Substituindo a equação (18) na (17), obtemos:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = [M - M_e](-XYt^{Y-1}) \quad (19)$$



As propriedades do ar e do grão estão contidas na tabela 1.

**Tabela 1 – Propriedades do ar e do grão contidas no trabalho de Zare *et al.* (2006)**

Propriedades do grão	$h_p = 0,2755c_a G \left( \frac{2r_0 G}{\mu_a} \right)^{-0,34} a_s$
	$c_p = 1109 + 4186M$
	$h_{fg} = 2,503 \times 10^6 - 2,386 \times 10^3(T_{abs} - 273,16)$
Propriedades do ar	$c_v = 1,883 \times 10^3 - 1,6737 \times 10^{-1}T + 8,4386 \times 10^{-4}T^2 - 2,6966 \times 10^{-7}T^3$
	$c_a = 1009,26 - 0,0040403T + 6,1759 \times 10^{-4}T^2 - 4,097 \times 10^{-7}T^3$
	$\mu_a = 1,691 \times 10^{-5} + 4,984 \times 10^{-8}T - 3,187 \times 10^{-1}T^2 + 1,319 \times 10^{-14}T^3$
	$\rho_a = \left( \frac{101,325}{0,287T_{abs}} \right)$
	$UR = \left( \frac{101,3W}{0,62189P_{sat} + WP_{sat}} \right)$
	$P_{sat} = 0,1exp \left[ 27,0214 - \frac{6887}{T_{abs}} - 5,31ln \left( \frac{T_{abs}}{273,16} \right) \right]$

Fonte: Desenvolvido pela autora

Onde:

$\mu_a$  = viscosidade do ar ( $kg/ms$ )

$r_p$  = raio equivalente da partícula ( $m$ )

$a_p$  = área superficial do leito ( $m^3/m^2$ )

$P_{sat}$  = pressão de saturação do vapor (Pa)

Os parâmetros constantes são apresentados na tabela 2:

**Tabela 2 – Parâmetros do modelo matemático retirados de Zare *et al.* (2006)**

Parâmetro	Unidade	Valor
G	$kg/m^2s$	0.22
$c_w$	$J/kgK$	4186
$r_o$	m	0,00457
$a_s$	$m^3/m^2$	2361

Fonte: Desenvolvido pela autora

O valor da porosidade do leito ( $\epsilon$ ) é obtida por Sadeghi *et al.* (2010). Para tal, deve-se escolher a qualidade Sazandegi<sup>1</sup>, e assim obter o valor de 48,85 %.

As condições iniciais (C.I) são dadas por:

$$\theta(x, 0) = \theta_i$$

$$M(x, 0) = M_i$$

$$T(x, 0) = T_i$$

<sup>1</sup> Refere-se à qualidade da semente de arroz estudada.

$$W(x, 0) = W_i$$

As condições de contorno (C.C) são:

$$T(0, t) = T_i$$

$$W(0, t) = W_i.$$

Resumidamente, tem-se as equações principais e suas C.C e C.I, na tabela 3:

**Tabela 3 – Equações principais com suas C.C. e C.I. - modelo completo**

E.D.P.	$G \frac{\partial W}{\partial x} = -\rho_p \frac{\partial M}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial W}{\partial t}$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$W = W_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$
C.C.	$W = W_i$	$x = 0 \text{ m}$	$t > 0$
E.P.D.	$\frac{\partial M}{\partial t} = (M_{in} - M_e) \cdot (-Xt^Y) \exp(-Xt^Y)$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$M = M_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$
E.D.P.	$G(c_a + c_v W) \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_p c_v (T - \theta) \frac{\partial M}{\partial t} - h_p (T - \theta) - \rho_a \epsilon (c_a + c_v W) \frac{\partial T}{\partial t}$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$T = T_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$
C.C.	$T = T_i$	$x = 0 \text{ m}$	$t > 0$
E.D.P.	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_p (c_p + c_w M)} \left[ h_p (T - \theta) + h_{fg} \rho_p \frac{\partial M}{\partial t} \right]$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$\theta = \theta_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$

Fonte: Desenvolvido pela autora

### 3.1.2.1 Desenvolvimento do modelo matemático simplificado

Ao levar em consideração que as derivadas temporais da temperatura do ar e umidade absoluta do ar são desprezíveis, as equações relativas ao teor de umidade e temperatura do ar são alteradas para:

$$G \frac{\partial W}{\partial x} = -\rho_p \frac{\partial M}{\partial t} \quad (20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{G(c_a + c_v W)} \rho_p c_v (T - \theta) \frac{\partial M}{\partial t} - h_p (T - \theta) \quad (21)$$

As novas EDPs para umidade absoluta e temperatura do ar, juntamente com as EDPs para umidade absoluta e temperatura do leito - que permaneceram inalteradas -, descrevem um outro modelo para a secagem de grãos de arroz em leito fixo, denominado neste trabalho como modelo simplificado.

É válido ressaltar que as condições de contorno e iniciais continuam as mesmas, sendo apresentadas juntamente com as equações na tabela 4.

Tabela 4 – Equações principais com suas C.C. e C.I. - modelo simplificado

E.D.P.	$G \frac{\partial W}{\partial x} = -\rho_p \frac{\partial M}{\partial t}$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$W = W_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$
C.C.	$W = W_i$	$x = 0 \text{ m}$	$t > 0$
E.D.P.	$\frac{\partial M}{\partial t} = (M_{in} - M_e) \cdot (-Xt^Y) \exp(-Xt^Y)$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$M = M_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$
E.D.P.	$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{G(c_a + c_v W)} \rho_p c_v (T - \theta) \frac{\partial M}{\partial t} - h_p (T - \theta)$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$T = T_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$
C.C.	$T = T_i$	$x = 0 \text{ m}$	$t > 0$
E.D.P.	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_p (c_p + c_w M)} \left[ h_p (T - \theta) + h_{fg} \rho_p \frac{\partial M}{\partial t} \right]$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t > 0$
C.I.	$\theta = \theta_i$	$0 < x \leq 0,4 \text{ m}$	$t = 0$

Fonte: Desenvolvido pela autora

Em seu trabalho, Zare *et al.* (2006) implementou o modelo simplificado utilizando a técnica das diferenças finitas. Este trabalho implementa tanto o modelo completo quanto o simplificado, a fim de comparar a precisão de cada um deles. A técnica utilizada é o método dos elementos finitos.

### 3.1.3 Procedimento numérico

A seguir são discutidas as ferramentas e modelagem utilizada para a resolução do problema levantado ao longo deste trabalho.

#### 3.1.3.1 O método dos elementos finitos

O COMSOL *Multiphysics* é um *software* que permite que as EDP's apresentadas sejam resolvidas. A plataforma oferece um pacote denominado *Mathematics*, que permite a simulação de diversos fenômenos físicos, quando descritos sob a forma de equações diferenciais.

A ferramenta utilizada para a resolução dos problemas é o método dos elementos finitos (MEF). Embora o *software* usualmente utilize este método, há também outros métodos complementares, tais quais o método dos volumes finitos (MVF), método de elementos de contorno e métodos de rastreamento de partículas.

O MEF é baseado na discretização de um domínio, ou seja, na divisão deste em elementos finitos. Estes elementos são conectados entre si por pontos, ou nós, e ao conjunto de todos esses itens dá-se o nome de malha.

O *software* utilizado realiza o estudo do modelo inserido nas etapas: pré-processamento, geração de malha, processamento e pós-processamento.

No pré-processamento são definidos a interface física que será utilizada para a resolução do problema proposto, a geometria, bem como os materiais e as condições de contorno. A malha gerada cria elementos subdivididos do modelo geométrico e apresenta as propriedades da estrutura a ele definidas. No *software* são disponibilizadas ferramentas de criação de malha automáticas e semi-automáticas, permitindo um refinamento global e local.

Na etapa do processamento, as equações numéricas e condições impostas são utilizadas para a obtenção de resultados convergentes.

No pós-processamento, é possível visualizar os resultados obtidos. Estas visualizações não estão limitadas às quantidades pré-definidas, podendo ser expandidas com quantidades físicas compostas e, desta forma, ter suas próprias expressões matemáticas. Assim, é possível visualizar praticamente todas as variáveis relacionadas com os resultados da simulação.

Devido às subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem o comportamento físico do modelo não são resolvidas de forma exata, mas sim aproximada. A precisão do método dependerá da quantidade de nós e elementos e dos tipos de elementos da malha. Dessa forma, quanto maior o número de nós no estudo, em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise.

### 3.1.3.2 O MEF aplicado ao *software* COMSOL

Para resolver corretamente as equações segundo o MEF, é necessário utilizar a técnica dos resíduos ponderados, que nada mais é do que a aproximação da solução de EDP's por uma função de forma, que se vale das mesmas condições iniciais de contorno estabelecidas no problema.

Aplicando a formulação de Galenkin para formular as equações que foram resolvidas, é necessário integrar a equação diferencial dada com a função de forma escolhida, conforme mostrado na equação (31):

$$\int_{x_1}^{x_2} S[\mu_e] dx = 0 \quad (22)$$

onde:

$\mu_e$  = equação diferencial geral a ser resolvida

S = função de forma.

Através de manipulações algébricas, pode-se mostrar que:

$$[C]\phi + [K]\phi + F = 0 \quad (23)$$

onde:

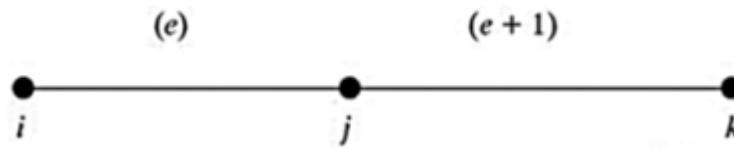
$K$  = matriz de rigidez

$C$  = matriz de capacitância

$F$  = vetor força.

Segundo Moaveni (1999), quando toma-se como base três nós consecutivos e seus respectivos elementos nodais, como representado na Figura 5, pode-se afirmar que o resíduo no nó  $j$  provém dos resíduos dos nós  $i$  e  $k$ .

**Figura 5 – Resíduo do nó intermediário  $j$  de uma malha unidimensional**



Fonte: Moaveni (1999)

Matematicamente, pode-se escrever que:

$$R_j = R_j^e + R_j^{e+1} = \int_{x_1}^{x_2} S_j^e[\mu]^e \int_{x_2}^{x_1} S_j^{e+1}[\mu]^{e+1} \quad (24)$$

Assim, o erro residual para cada nó, ou elemento finito, é tido como:

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

### 3.1.3.3 Inserção das equações no COMSOL

A formulação dos elementos finitos pelo *software* COMSOL dependerá dos termos que serão necessários para a inserção das equações. Aquelas que não dependem de um fator geométrico podem ser inseridas de acordo com a equação (35), mais simples e, portanto, menores recursos computacionais são necessários. Já as equações que apresentam algum fator geométrico, devem ser inseridas de acordo com a equação (36).

$$e_a \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \phi}{\partial t} = f \quad (25)$$

Onde:

$e_a$  = coeficiente de massa

$\phi$  = variável de interesse

$d_a$  = coeficiente de amortecimento ou de massa

$t$  = tempo

$f$  = termo fonte.

$$e_a \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla(-c \nabla \phi - \alpha \phi + \gamma) + \beta \nabla \phi + a \phi = f \quad (26)$$

onde:

$c$  = coeficiente de difusão

$\alpha$  = coeficiente de convecção do fluxo conservativo

$\gamma$  = fonte fluxo conservativo

$\beta$  = coeficiente convectivo

$a$  = coeficiente de absorção

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

Tendo em vista que as equações apresentadas para o modelo proposto devem seguir essa formulação, o modelo completo é inserido no *software* conforme consta na tabela 5.

**Tabela 5 – Coeficientes a serem inseridos - modelo completo**

$\phi$	$e_a$	$d_a$	$\beta$	$f$
M	0	1	Não se aplica	$nojac(-(M - M_e)XY(\frac{t}{60})^{Y-1})$
$\theta$	0	$\rho_p(c_p + c_w M)$	Não se aplica	$h_a(T - \theta) + h_v \rho_p M t$
T	0	$\rho_a \epsilon (c_a + c_v W)$	$G(c_a + c_v W)$	$\rho_p c_v (T - \theta) M t - h_a (T - \theta)$
W	0	$\epsilon$	1	$-\frac{\rho_p}{G} M t$

Fonte: Desenvolvido pela autora

Os coeficientes que não constam na tabela -  $c$ ,  $\phi$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  e  $a$  - são nulos.

De maneira geral, o tempo nas equações dos modelos completo e simplificado é expresso em segundos. O coeficiente  $f$  da equação diferencial do teor de umidade, entretanto, deve ter o tempo em minutos. Além disso, é importante ressaltar que o operador "nojac()" utilizado é necessário a fim de não derivar a função da umidade do ar ao inserir o problema na matriz jacobiana. Caso a derivação ocorra, o *software* não consegue simular o modelo proposto.

Os coeficientes a serem inseridos para o modelo simplificado devem estar de acordo com os apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Coeficientes a serem inseridos - modelo simplificado

$\phi$	$e_a$	$d_a$	$\beta$	f
M	0	1	Não se aplica	$nojac(-(M - M_e)XY(\frac{t}{60})^{Y-1})$
$\theta$	0	$\rho_p(c_p + c_w M)$	Não se aplica	$h_a(T - \theta) + h_v \rho_p M t$
T	0	0	$G(c_a + c_v W)$	$\rho_p c_v (T - \theta) M t - h_a (T - \theta)$
W	0	0	1	$-\frac{\rho_p}{G} M t$

Fonte: Desenvolvido pela autora

O *software* utilizado também possui um operador ("pd()"), que permite realizar a derivação parcial de forma numérica. Dessa forma, há também a possibilidade de utilizar a equação do teor de umidade do leite, conforme apresentada na equação (14). Sua utilização se justifica para mensurar em quais intervalos de tempo a equação (19) é válida, ou seja, para quais pequenos intervalos de tempo as derivadas temporais da temperatura do ar e da umidade relativa do ar podem ser desprezadas.

O detalhamento do código inserido, bem como as funções auxiliares utilizadas, é disposto no Apêndice A.

### 3.2 ANÁLISES ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

As análises energética e exergética do modelo validado se fazem necessárias para encontrar as interações energéticas e o comportamento termodinâmico do ar de secagem ao longo do leite.

As análises foram realizadas de acordo com Ranjbaran *et al.* (2014). Este procedimento foi o escolhido por não requerer os fatores geométricos da modelagem proposta, tais como a área de troca de calor do leite com o ar quente ou a profundidade do leite sejam definidos. Além do mais, este procedimento não exige que a temperatura termodinâmica média seja utilizada no cálculo da eficiência exergética, reduzindo a complexidade da análise requerida.

#### 3.2.1 Análise energética

Segundo Sarker *et al.* (2015), a indústria da secagem visa maximizar a eficiência energética, a fim de identificar o quanto eficientemente a energia é utilizada pelo secador. Este autor ainda ressalta que uma baixa eficiência energética é crítica para os usuários de secadores de grãos, que lidam com *commodities* e produtos com baixo valor agregado, afetando assim, os custos de funcionamento do secador.

Ranjbaran *et al.* (2014) define a eficiência energética como a relação da energia demandada na evaporação da umidade dos grãos e a energia incorporada no ar de

entrada. Matematicamente, esta relação é expressa por:

$$\eta_{en} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_h \delta V)_i}{\dot{E}_{in}} \quad (27)$$

Onde:

$S_h$  = termo fonte ( $W/m^3$ );

$\delta V$  = volume de cada célula computacional ( $m^3$ );

$\dot{E}_{in}$  = taxa de energia incorporada pelo ar de entrada ( $W$ ).

Tendo em vista que o problema tratado por Ranjbaran *et al.* (2014) é tridimensional, enquanto que o modelo apresentado neste trabalho é unidimensional, modifica-se a equação (27):

$$\frac{\eta_{en}}{\delta y \cdot \delta z} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_h \delta x)_i}{\dot{E}_{in}} \quad (28)$$

Onde:

$\delta x$  = passo no leito ( $m$ );

$\delta z$  = passo na profundidade do leito ( $m$ );

$\delta y$  = passo na largura do leito ( $m$ ).

$\frac{\eta_{en}}{\delta y \cdot \delta z}$  é, neste trabalho, definido como eficiência energética específica, representando assim, a eficiência energética do leito por metro quadrado.

O termo fonte é definido por Ranjbaran *et al.* (2014) como:

$$S_h = (1 - \epsilon) \rho_p \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \quad (29)$$

Por fim, a taxa de energia incorporada pelo ar de entrada é definido como:

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}_a (c_a + W c_v) (T_{in} - T_{amb}) \quad (30)$$

Onde:

$\dot{m}_a$  = fluxo de massa do ar na entrada do secador ( $kg/s$ );

$T_{amb}$  = temperatura do ar ambiente ( $K$ ).

O fluxo de massa do ar de entrada do secador é definido como:

$$\dot{m}_a = G \cdot A_a \quad (31)$$



Onde:

$A_a$  = área da seção de entrada do ar de secagem ( $m^2$ ).

### 3.2.2 Análise exergética

Inaba *et al.* (2007) define exergia como o trabalho tomado em um sistema devido a sua condição de não-equilíbrio em relação ao ambiente como um estado de referência.

Tendo em vista esta definição, Fortes (2004) afirma que a metodologia exergética tem sido aplicada em análise e projeto de equipamentos, em várias áreas que utilizam energia intensamente, como a térmica, química e metalúrgica, sistemas de calor e fluido, indústria alimentícia, ou qualquer outra aplicação a fim de estabelecer um compromisso entre energia e sustentabilidade.

Inaba *et al.* (2007) ainda ressalta que a análise exergética é baseada na primeira e segunda lei da termodinâmica; sendo que a exergia não é sujeita à lei da conservação, mas consumida ou destruída por irreversibilidades.

Ranjbaran *et al.* (2014) define a eficiência exergética como:

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T} \right) S_h \delta V \right)_i}{\dot{E}_{X_{in}}} \quad (32)$$

Onde:

$\dot{E}_{X_{in}}$  = taxa de exergia do ar de entrada (W).

Novamente,  $\delta V$  foi ser substituído por  $\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$ , sendo introduzida a grandeza eficiência exergética específica:

$$\frac{\eta_{ex}}{\delta z \cdot \delta y} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T} \right) S_h \delta x \right)_i}{\dot{E}_{X_{in}}} \quad (33)$$

Onde:

$\frac{\eta_{ex}}{\delta z \cdot \delta y}$  = eficiência exergética específica.

Por fim, a taxa de exergia do ar de entrada é definido por Ranjbaran *et al.* (2014) como:

$$\dot{E}_{X_{in}} = \dot{m}_a (c_a + W c_v) \left( T_{in} - T_{amb} - \ln \frac{T}{T_{amb}} \right) \quad (34)$$

### 3.3 OTIMIZAÇÃO

O *software* utilizado possui um pacote complementar que pode ser usado junto com qualquer módulo do COMSOL *Multiphysics* a fim de otimizar o projeto (COMSOL..., 2017). Para tal, é necessário seguir o seguinte passo a passo:

1. Definição da função objetivo;
2. Definição de um conjunto de variáveis de projeto - os parâmetros do modelo que deseja-se alterar. No caso da secagem de grãos, escolhe-se a temperatura do ar e a vazão volumétrica;
3. Definição de um conjunto de restrições, limites para as variáveis do projeto ou condições operacionais que precisam ser respeitadas. No caso do nosso problema, deve-se observar os máximos e mínimos para os parâmetros temperatura e umidade do ar e do leite que mantém as boas qualidades da semente. Estes parâmetros são retirados da literatura;
4. Otimização do projeto, alterando as variáveis ao mesmo tempo em que satisfaz todas as restrições.

O pacote complementar possui duas técnicas de otimização: otimização livre de derivadas e otimização baseada em gradientes. A otimização livre de derivadas é útil quando as funções objetivo e restrições podem ser descontínuas e não possuem derivadas analíticas, tendo como vantagem sua simplicidade. Para esta otimização estão disponibilizados quatro métodos: *Boundary Optimization by Quadratic Approximation* (BOBYQA), Nelder-Mead, busca por coordenadas e Monte Carlo. Neste tipo de otimização calcula-se um gradiente aproximado para evoluir as variáveis de projeto visando um projeto aperfeiçoado. Para tal estão disponíveis os seguintes algoritmos: método adjunto do otimizador SNOPT, *solver Levenberg-Marquardt* (quando a função objetivo for do tipo mínimos quadrados) e o *Method of Moving Asymptotes* (MMA).

A técnica de otimização baseada em gradientes tem como vantagem o tratamento de problemas que envolvem centenas, ou até mesmo milhares, de variáveis de um projeto com pouco incremento no uso de recursos computacionais à medida que o número de variáveis do projeto aumenta. O método Adjunto calcula simultaneamente todas as derivadas analíticas, podendo incluir funções restrição mais complexas.

Por fim, a técnica da Estimativa de Parâmetros estima as propriedades do material utilizado através de correlações feitas entre um modelo contido no *software* COMSOL e dados experimentais.

O método de otimização escolhido para ser aplicado ao modelo é a busca por coordenadas, devido à sua simplicidade e, portanto, maior agilidade na otimização.

### 3.3.1 Definição da função objetivo

Tendo em vista que altas eficiências exergéticas correspondem a altas eficiências do projeto, define-se esta grandeza como a função objetivo a ser otimizada no modelo proposto.

### 3.3.2 Definição do conjunto de variáveis do projeto

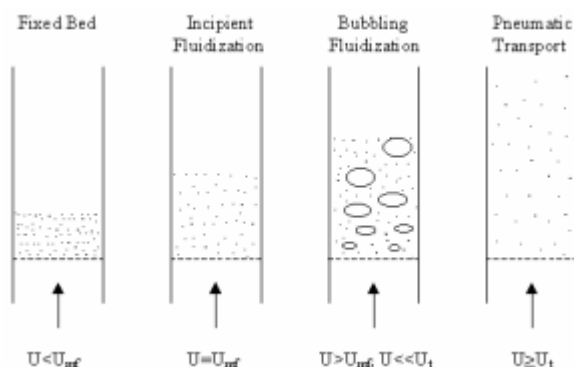
Baseando-se no trabalho desenvolvido por Zare *et al.* (2006), é perceptível que os autores iniciaram o processo de otimização ao variar as grandezas temperatura e fluxo volumétrico do ar de entrada. Assim, para dar prosseguimento lógico, estes parâmetros foram as variáveis do projeto.

### 3.3.3 Definição do conjunto de restrições

A definição da restrição relativa à velocidade do ar de entrada está relacionada com a definição do modelo adotado: secagem de grãos de arroz em leito fixo. Fisicamente, os grãos tendem a serem arrastados quando o ar de entrada for introduzido a grandes velocidades e, assim, o leito passa a ser fluidizado, e não mais fixo.

Inaba *et al.* (2007) explicam que este fenômeno ocorre devido a uma queda de pressão através das camadas de partículas, até que todas estejam suspensas no ar de secagem, tornando o leito fluidizado, conforme mostrado na figura 6. A velocidade do ar que inicia o processo de fluidização do leito é denominada como mínima velocidade de fluidização.

Figura 6 – Região do gás de fluidização



Fonte: Inaba *et al.* (2007)

Khanali *et al.* (2016), em seu estudo sobre a secagem de grãos de arroz em leito fluidizado, definem a mínima velocidade de fluidização do ar como 1,7 m/s. A conversão desta grandeza para a vazão mássica específica, presente neste trabalho, é dada pela equação :

$$v = \frac{G}{\rho_a} \quad (35)$$

Onde:

$v$  = velocidade do ar de entrada ( $m/s$ ).

A restrição relativa à temperatura do ar de secagem deve levar em conta os malefícios que as altas temperaturas de secagem podem causar nas sementes de arroz secas. Menezes *et al.* (2012), por exemplo, citam que temperaturas de secagem de 50 °C ocasionam fissuras na semente após sua secagem.

Tendo em vista estas considerações, bem como o trabalho desenvolvido por Menezes *et al.* (2012), define-se que a temperatura de secagem dos grãos de arroz devem variar entre 32 e 50 °C.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com os modelos anteriormente descritos são apresentados a seguir. Inicialmente, o modelo proposto foi validado através do confronto com dados experimentais expostos em Zare *et al.* (2006). Também foram apresentados resultados das análises energética e exergética. Por fim, o modelo com melhor desempenho foi otimizado.

### 4.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO

As condições iniciais (C.I.) propostas por Zare *et al.* (2006) em seu trabalho são:

$$\theta(x, 0) = 25^{\circ}C$$

$$M(x, 0) = 24.6 \text{ kg/kg}$$

$$T(x, 0) = 50^{\circ}C$$

$$W(x, 0) = 1 \text{ kg/kg}$$

Já as condições de contorno (C.C.) são:

$$T(0, t) = 50^{\circ}C$$

$$W(0, t) = 1 \text{ kg/kg}$$

A fim de validar o modelo proposto, foi preciso retirar os dados experimentais da literatura. A coleta destes dados é realizada através de um *software online*. Seu passo a passo está disponível no Apêndice B.

Após retirar os dados, foi necessário tomar algumas decisões, na ordem a seguir:

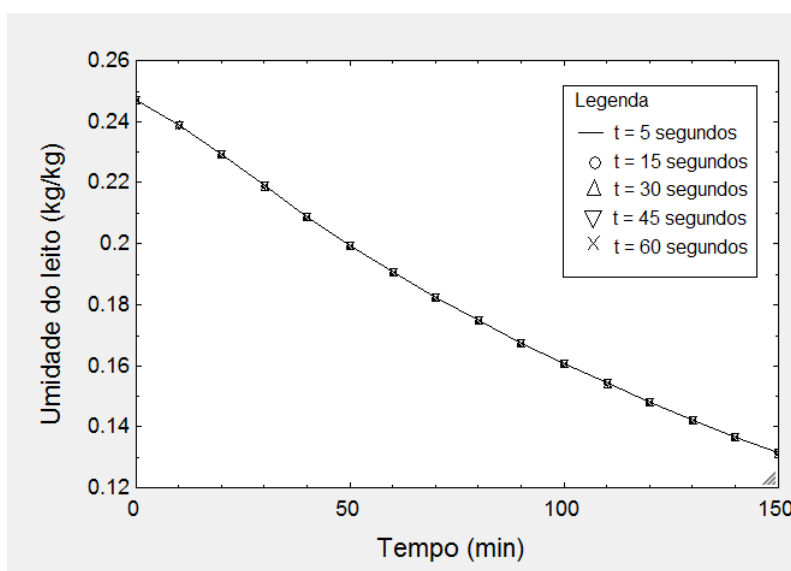
1. Definir qual o melhor passo no tempo;
2. Definir a melhor malha para o modelo proposto;
3. Definir qual o melhor modelo: se completo ou simplificado;
4. Comparar o resultado obtido neste trabalho com os dados experimentais e aqueles obtidos por Zare *et al.* (2006).

#### 4.1.1 Definição do melhor passo no tempo

De posse das C.C. e C.I., simula-se o modelo completo utilizando o *software* COMSOL, através da técnica dos elementos finitos. A malha utilizada nesta simulação é a normal, com 27 nós, conforme definida pela tabela 7, do item 4.1.2.

Os passos no tempo testados foram de 5, 15, 30, 45 e 60 segundos. Os resultados foram obtidos para a faixa do leito disposta entre 8 e 9 centímetros, conforme consta na figura 7:

**Figura 7 – Resultados obtidos com simulações para diferentes passos de tempo**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Como pode ser visualmente observado na Figura 6, a alteração do passo no tempo não produziu diferença significativa na umidade do leito resultante para o modelo completo, na faixa entre 8 e 9 centímetros. Considera-se que a alteração da vazão mássica específica do ar, C.C., C.I., ou a alteração da faixa de análise do leito, não alteraram significativamente este resultado. Dessa forma, o passo no tempo adotado foi o de 30 segundos.

#### 4.1.2 Teste de malha

Nesta etapa, torna-se necessário realizar um teste de malhas, a fim de verificar o melhor tamanho de elementos para o modelo proposto. Os testes realizados utilizaram malhas que apresentaram um maior refinamento nas regiões de estudo, previamente definidas no *software* COMSOL.

As informações sobre as malhas testadas estão apresentadas na tabela 7.

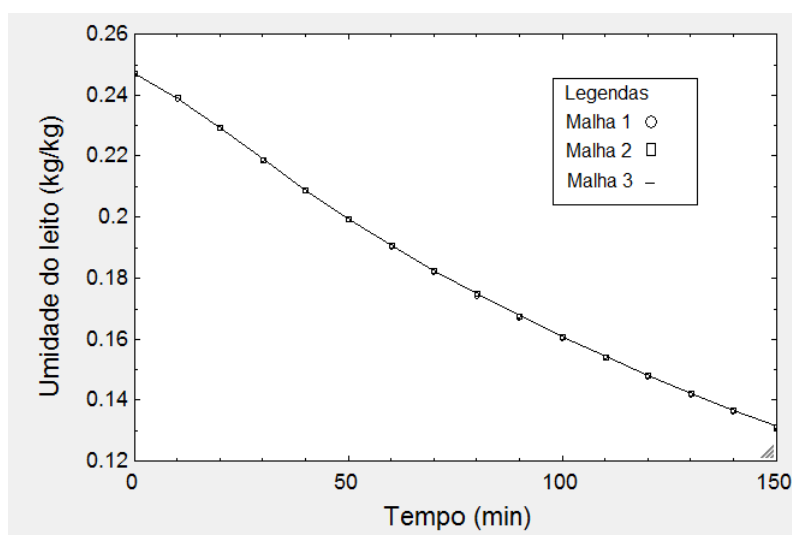
Tabela 7 – Dados das malhas utilizadas

-	Número de nós	Máximo tamanho do elemento (m)	Máxima taxa de crescimento
Malha 1	50	0,005	1,2
Malha 2	27	0,0168	1,3
Malha 3	15	0,05	1,8

Fonte: Desenvolvido pela autora

Novamente, o teste de malha foi realizado tendo como referência o modelo completo, para uma faixa do leito entre 8 e 9 centímetros. Os resultados obtidos para teor de umidade absoluta do leito foram mostrados e comparados na figura 8:

Figura 8 – Resultados obtidos com diferentes malhas para o caso 1, faixa do leito entre 8 e 9 cm



Fonte: Desenvolvido pela autora

A fim de melhor decidir se a mudança das malhas é decisiva no resultado final, foram calculados os erros relativos para cada malha testada, conforme a equação (36).

$$E = \frac{|M_j - \hat{M}_j|}{M_j} \times 100 \quad (36)$$

Onde:

E = erro relativo;

$M_j$  = umidade do leito obtida experimentalmente

$\hat{M}_j$  = umidade do leito obtida numericamente

Outra importante forma de avaliar a precisão de cada modelo é o desvio relativo médio. Sua formulação segue a equação (37).

$$\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{M_j - \hat{M}_j}{\hat{M}_j} \right)^2 \right]^{0.5} \times 100 \quad (37)$$

Onde:

MRD = desvio relativo médio

n = número de medições em cada experimento.

A maior diferença entre os erros obtidos por cada malha, juntamente com o MRD obtido para cada malha está disposta na tabela 8.

**Tabela 8 – Diferença dos erros e MRD de cada malha, para o caso 1**

-	Malha	Maior diferença entre os erros (%)	MRD (%)
Caso 1: faixa entre 8 e 9 cm	1	0,29	3,68
	2	-	3,59
	3	0,21	3,53

Fonte: Desenvolvido pela autora

Como exposto na tabela 8, a maior diferença entre os erros obtidos é de 0,29 %. Além disso, a análise do MRD mostra que a malha 2 e a malha 3 apresentam resultados extremamente semelhantes, com diferenças que poderiam ser facilmente negligenciadas. Desse modo, a mudança das malhas não é expressiva e, portanto, a malha escolhida para a simulação do modelo proposto é a malha 2, visto que esta malha é a inicialmente escolhida pelo software utilizado, além de ser utilizada nas simulações anteriores, para a escolha do passo no tempo mais adequado.

Vale ainda ressaltar que como a alteração da malha não modifica o resultado de forma expressiva para o caso estudado, alterações nas condições de contorno e iniciais, bem como parâmetros constantes, não alterariam os resultados de forma significativa.

#### 4.1.3 Comparação entre os modelos completo e simplificado

Tendo fixado o passo no tempo de 30 segundos, faz-se necessário determinar qual modelo, completo ou simplificado, apresenta os melhores resultados para a umidade absoluta do leite, quando comparado com os dados experimentais.

Os resultados obtidos com as simulações corresponderam à umidade média para intervalos de leite entre 8 e 9 centímetros e 17 e 18 centímetros, para os quatro testes estudados, conforme consta na tabela 9.



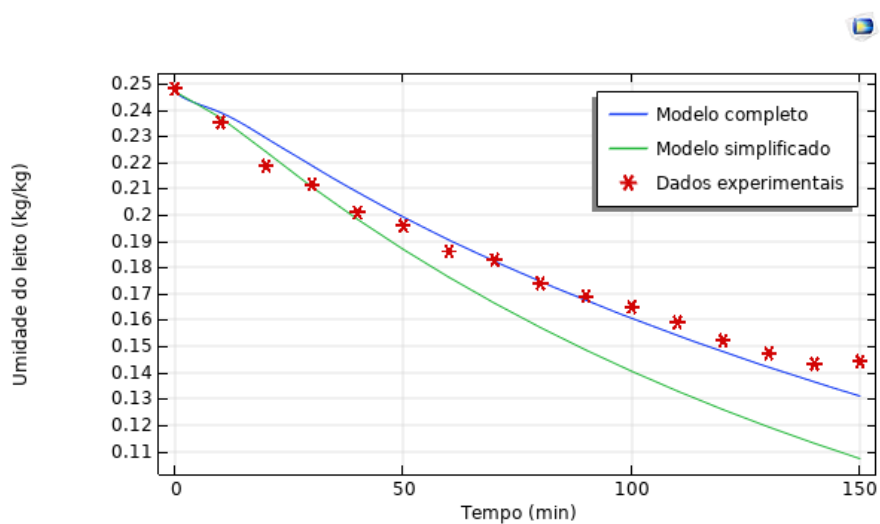
Tabela 9 – Casos estudados

Caso	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Vazão específica ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )	Umidade do leito ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
1	50	0,22	0,2469
2	45	0,22	0,2587
3	50	0,16	0,2475
4	45	0,16	0,2512

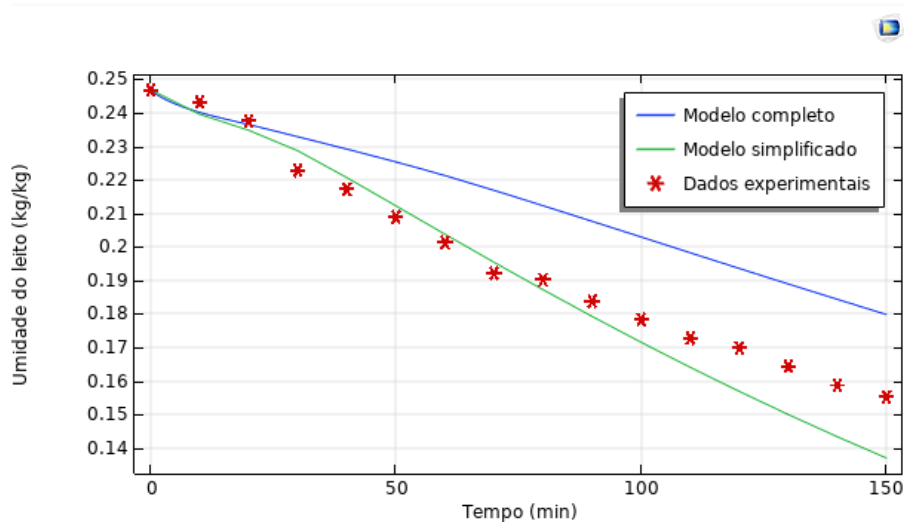
Fonte: Desenvolvido pela autora

Os resultados obtidos são confrontados com os dados experimentais para o caso 1 - temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$ , conforme disposto na Figura 9.

Figura 9 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 1



(a) Intervalo entre 8 e 9 cm



(b) Intervalo entre 17 e 18 cm

Fonte: Desenvolvido pela autora

Como pode ser observado graficamente, o modelo completo apresentou maior precisão para intervalos localizados próximos à entrada de ar quente, enquanto que o modelo simplificado apresentou maior precisão para regiões mais distantes da entrada do ar de secagem.

Os dados numéricos obtidos, bem como os erros relativos para todos os casos, estão dispostos no Apêndice C. Os demais casos apresentaram comportamento semelhante ao do caso 1 e, portanto, estão dispostos no Apêndice D.

Os dados obtidos numericamente para a umidade do leito dos modelos completo e simplificado são confrontados com aqueles obtidos experimentalmente para a mesma grandeza. Tanto os erros relativos máximo e mínimo, quanto o desvio relativo médio de cada caso estão apresentadas na tabela 10:

**Tabela 10 – Erro máximo e desvio relativo médio de cada caso - modelos completo e simplificado**

Caso	Modelo	Erro máximo (%)	MRD (%)
Caso 1 - faixa entre 8 e 9 cm	Completo	9,18	3,59
	Simplificado	25,69	12,85
Caso 1 - faixa entre 17 e 18 cm	Completo	16,16	11,24
	Simplificado	11,75	5,212
Caso 2 - faixa entre 8 e 9 cm	Completo	19,02	6,23
	Simplificado	21,35	11,51
Caso 2 - faixa entre 17 e 18 cm	Completo	17,71	11,21
	Simplificado	6,83	3,26
Caso 3 - faixa entre 8 e 9 cm	Completo	7,62	4,85
	Simplificado	17,69	8,47
Caso 3 - faixa entre 17 e 18 cm	Completo	27,09	13,99
	Simplificado	3,58	1,87
Caso 4 - faixa entre 8 e 9 cm	Completo	7,23	4,93
	Simplificado	18,57	8,64
Caso 4 - faixa entre 17 e 18 cm	Completo	18,39	10,66
	Simplificado	4,35	1,78

Fonte: Desenvolvido pela autora

Como pode ser percebido tanto pelo erro relativo máximo, quanto pelo desvio relativo médio, o modelo completo é mais apropriado para quando as análises feitas estão localizadas em zonas mais próximas da entrada de ar, enquanto que o modelo simplificado é mais apropriado para quando as análises são realizadas em zonas mais distantes da entrada de ar quente. Portanto, ambos os modelos foram adotados neste trabalho, cada um com sua condição.

A única explicação possível para este comportamento reside no fato de que,

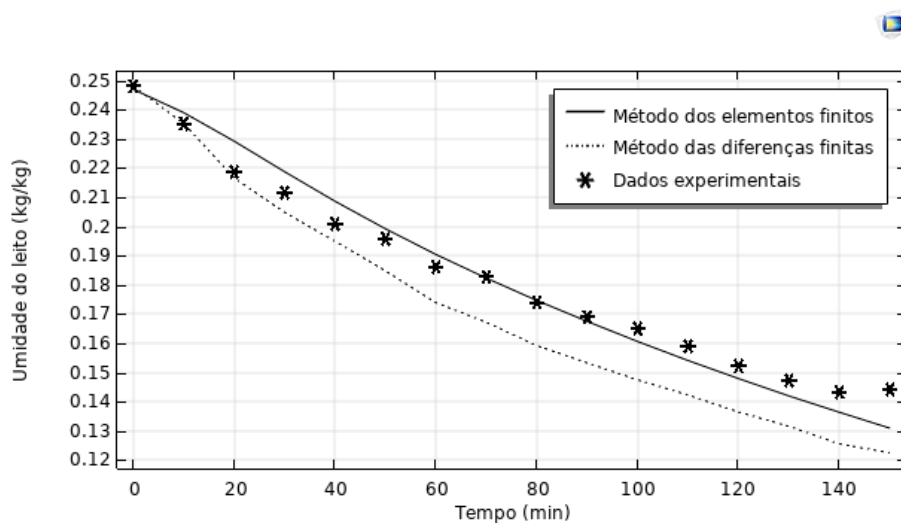
para regiões mais próximas da entrada de ar quente, a variação da temperatura com o tempo é maior do que quando comparada com regiões mais afastadas da entrada do ar, alterando significativamente o resultado obtido para a umidade absoluta do leite.

#### **4.1.4 Comparação entre os resultados numéricos por elementos finitos e os resultados obtidos na literatura**

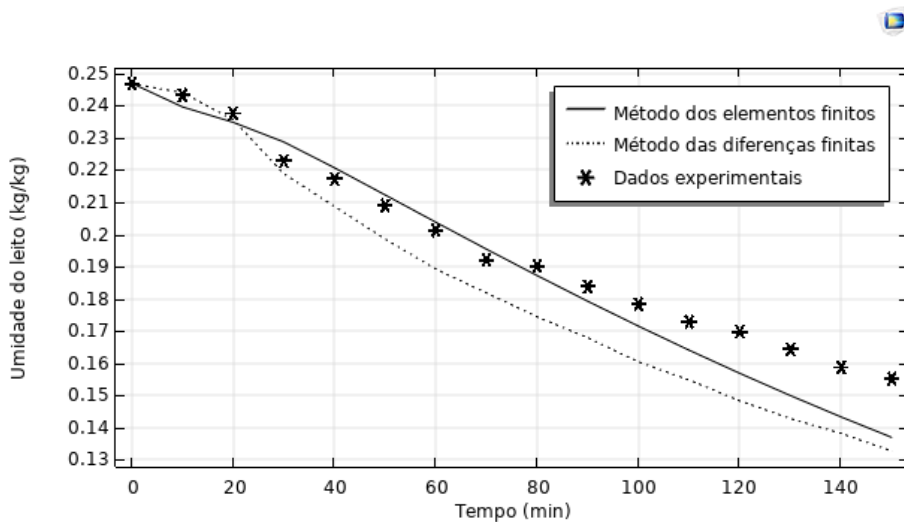
Definido que o melhor passo no tempo para o modelo matemático apresentado é de 30 segundos, que a malha mais apropriada é a malha 2 e que o modelo completo é mais adequado para a região do leite localizada entre 8 e 9 centímetros, e o simplificado é mais adequado para a região entre 17 e 18 centímetros, faz-se necessário verificar se os resultados numéricos obtidos neste trabalho apresentam alguma melhora quando comparados com aqueles obtidos na literatura. Estes, por sua vez, foram obtidos utilizando-se o método das diferenças finitas (MEF).

Os resultados obtidos para o caso 1, podem ser visualmente comparados através dos gráficos contidos na figura 10. Os gráficos obtidos com os resultados dos demais casos estão contidos no apêndice E.

Figura 10 – Confronto entre resultados numéricos obtidos por MEF e MDF: caso 1



(a) Intervalo entre 8 e 9 cm



(b) Intervalo entre 17 e 18 cm

Fonte: Desenvolvido pela autora

A fim de melhor comparar os resultados numéricos obtidos para a umidade absoluta do leito pelos MEF e MDF, foram calculados o erro máximo (%) e o MRD (%), conforme consta na tabela 11.

Como pode ser percebido, tanto numericamente pelo cálculo do MRD, quanto visualmente pelos gráficos apresentados, o MEF obteve melhor desempenho para a umidade do leito absoluta, quando comparados com os resultados obtidos pelo MDF.

**Tabela 11 – Erro máximo e desvio relativo médio de cada caso - comparação entre resultados obtidos por MEF e MDF**

Caso	Método numérico	Erro máximo (%)	MRD (%)
Caso 1 - faixa entre 8 e 9 cm	MDF	15,05	8,47
	MEF	9,18	3,59
Caso 1 - faixa entre 17 e 18 cm	MDF	14,48	8,55
	MEF	11,75	5,22
Caso 2 - faixa entre 8 e 9 cm	MDF	13,45	8,65
	MEF	7,06	6,23
Caso 2 - faixa entre 17 e 18 cm	MDF	17,62	8,54
	MEF	6,83	3,26
Caso 3 - faixa entre 8 e 9 cm	MDF	14,59	8,36
	MEF	7,62	4,85
Caso 3 - faixa entre 17 e 18 cm	MDF	13,23	7,70
	MEF	3,58	1,87
Caso 4 - faixa entre 8 e 9 cm	MDF	14,20	7,45
	MEF	7,05	4,93
Caso 4 - faixa entre 17 e 18 cm	MDF	14,06	8,50
	MEF	4,35	1,78

Fonte: Desenvolvido pela autora

## 4.2 ANÁLISE DA TEMPERATURA E UMIDADE ABSOLUTA DO AR E TEMPERATURA DO LEITO

Validado o modelo, faz-se necessário analisar os demais parâmetros do modelo, a fim de verificar se seu comportamento é fisicamente condizente.

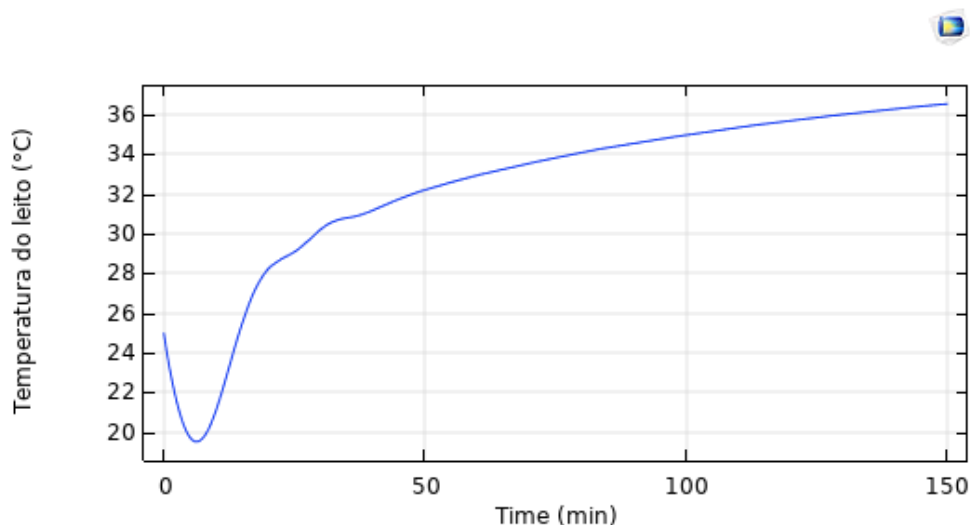
As análises foram feitas para as duas faixas do leito estudadas. Apenas o estudo do caso 1 é necessário, visto que espera-se que o comportamento destes parâmetros seja semelhante para diferentes temperatura e vazão específica do ar.

Assim como feito para a análise da umidade absoluta do leito, o modelo completo é adotado para a faixa do leito de 8 a 9 centímetros, enquanto que o modelo simplificado é adotado para faixa do leito entre 17 e 18 centímetros.

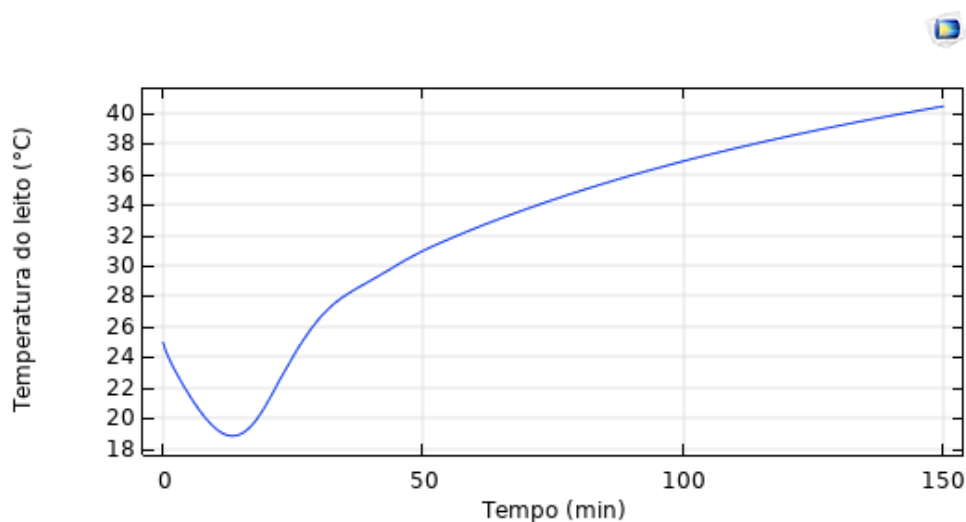
### 4.2.1 Temperatura do leito

A temperatura do leito para as faixas do leito 8-9 e 17-18 centímetros é mostrada, na figura 11.

**Figura 11 – Análise da temperatura do leito ao longo do tempo**



**(a) Intervalo entre 8 e 9 cm**



**(b) Intervalo entre 17 e 18 cm**

Fonte: Desenvolvido pela autora

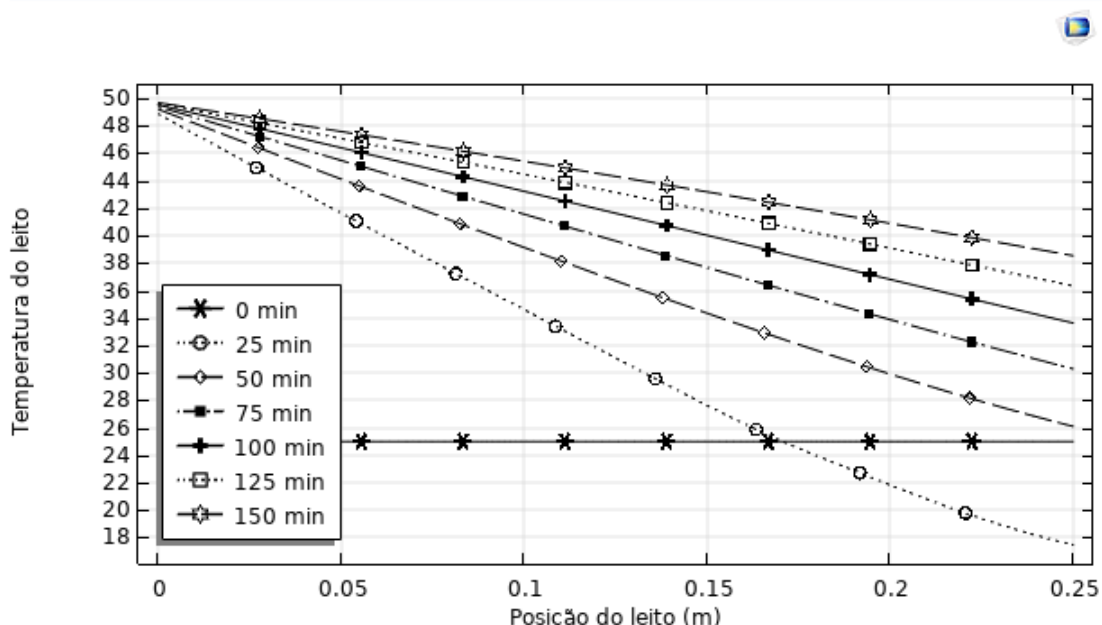
O comportamento da temperatura do leito ao longo do tempo está coerente com aquele apresentado por ElGamal *et al.* (2013). Neste trabalho, os pesquisadores ressaltam que a redução da temperatura do leito nos instantes iniciais ocorre porque a maior parte do calor que chega aos grãos é utilizada para a evaporação da umidade, nestes instantes. À medida em que o tempo passa, menos calor é requerido no processo de evaporação, permitindo que o calor proveniente do ar de fato aqueça o leito de grãos.

É também interessante observar que faixas do leito mais afastadas da entrada do ar quente, por receberem um ar mais frio, apresentam esse processo de resfriamento para posterior aquecimento ocorrendo um pouco mais tardio do que nas faixas do leito

mais próximas da entrada de ar quente.

A fim de melhor analisar a temperatura do leito, este parâmetro foi analisado ao longo do leito para diferentes tempos de simulação, como consta na figura 12.

**Figura 12 – Análise da temperatura do leito ao longo do leito**



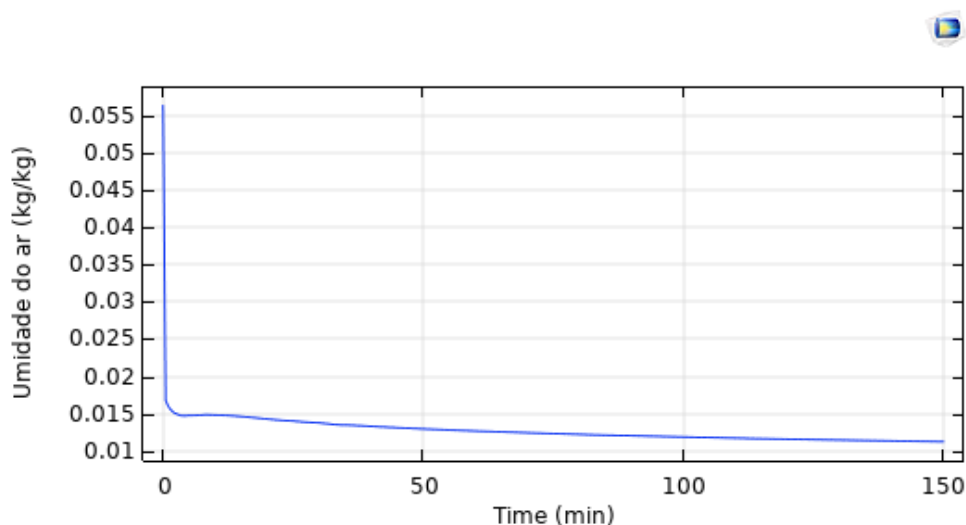
Fonte: Desenvolvido pela autora

Inicialmente, o leito encontra-se à temperatura de 25 °C. Nos primeiros minutos de simulação, foi observado que os grãos localizados próximo à entrada de ar quente apresentaram aumento significativo de sua temperatura, sendo que quanto mais próximo da entrada do ar de secagem, mais quente o leito se apresentava. Também foi observado que as regiões do leito localizadas distante da entrada do ar de secagem apresentaram um decréscimo significativo em sua temperatura. Este fenômeno ocorre porque a água presente nas sementes utiliza-se da energia contida nas redondezas para evaporar, reduzindo assim a temperatura nestas localidades. Com o passar do tempo de simulação, o leito tem sua temperatura aumentada, pois grande parte da evaporação já ocorreu e, portanto, o calor contido no ar de secagem é utilizado para aumentar a temperatura do leito.

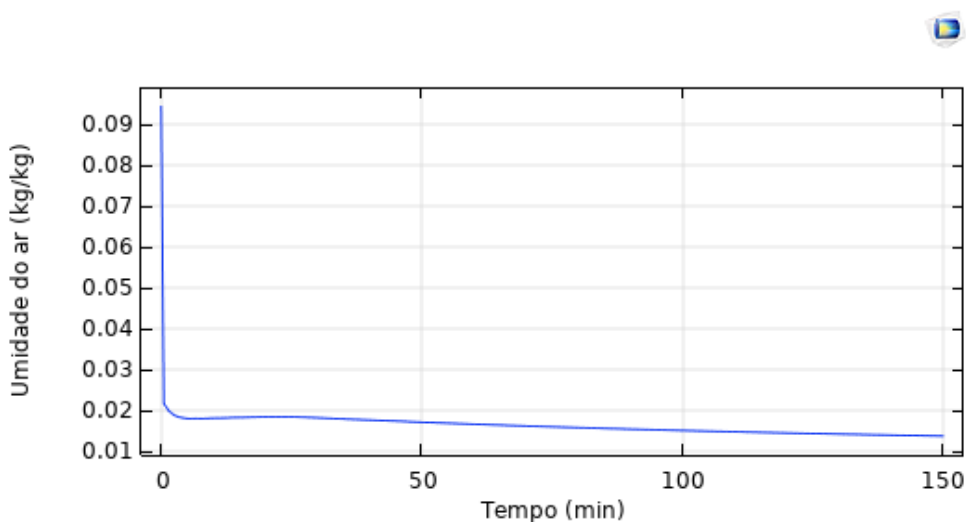
#### 4.2.2 Umidade absoluta do ar

A umidade absoluta do ar para as faixas do leito 8-9 e 17-18 centímetros é mostrada na figura 13.

**Figura 13 – Análise da umidade absoluta do ar ao longo do tempo**



**(a) Intervalo entre 8 e 9 cm**



**(b) Intervalo entre 17 e 18 cm**

Fonte: Desenvolvido pela autora

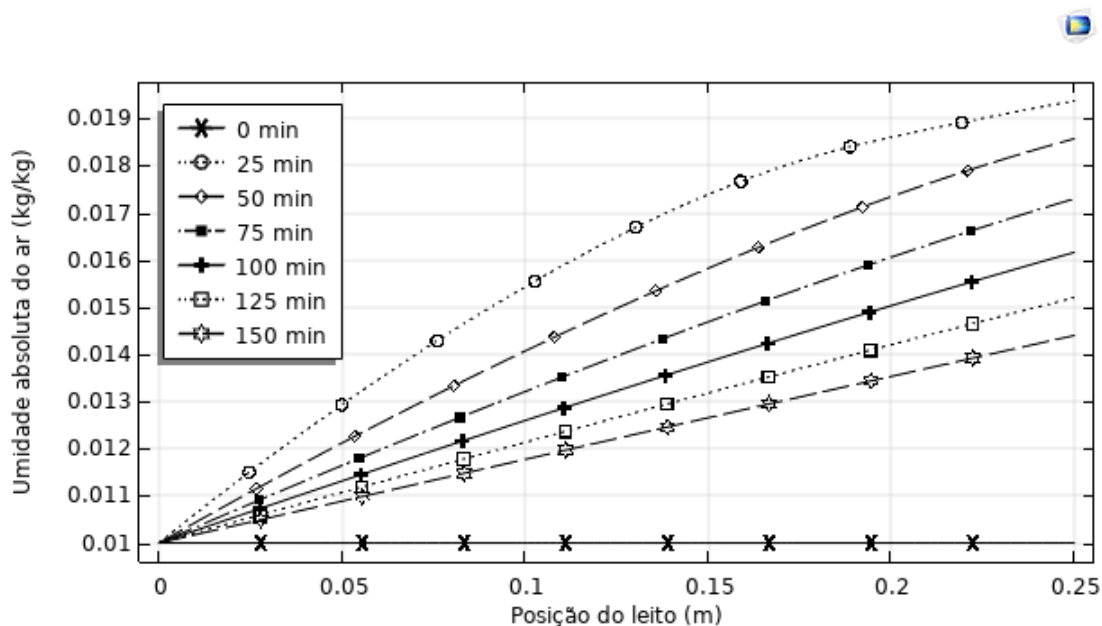
As curvas apresentadas nos gráficos apresentam o comportamento de uma queda brusca, seguida de uma descida suave, demonstrando que há uma evaporação intensa nos primeiros instantes do processo, como previsto.

Nota-se também que os grãos localizados em faixas do leito mais próximas da entrada de ar quente são mais secos do que aqueles localizados mais distantes da entrada do ar de secagem.

A fim de melhor analisar a umidade absoluta do ar, este parâmetro foi analisado ao longo do leito para diferentes tempos de simulação, como consta na figura 14.



Figura 14 – Análise da umidade absoluta do ar ao longo do leito



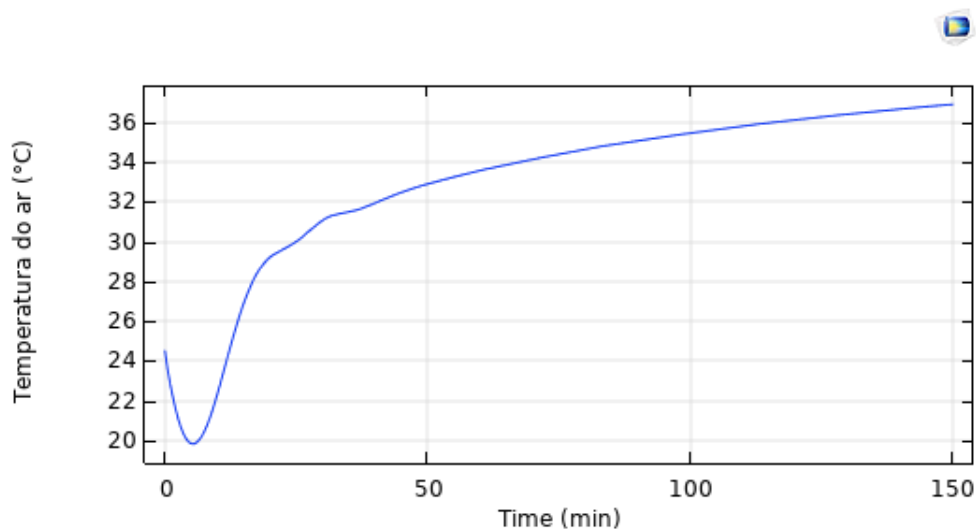
Fonte: Desenvolvido pela autora

Inicialmente a umidade absoluta do ar estava em 1 %, conforme previsto pelas condições iniciais. No decorrer da simulação, foi observado um aumento significativo deste parâmetro, devido à evaporação da água contida no leito. Também é notável que o ar de secagem apresenta maior acréscimo da umidade absoluta do ar nos primeiros minutos de simulação, do que no final desta. Este fenômeno se deve ao fato de que, ao final do processo, grande parte da umidade absoluta do leito já foi evaporada.

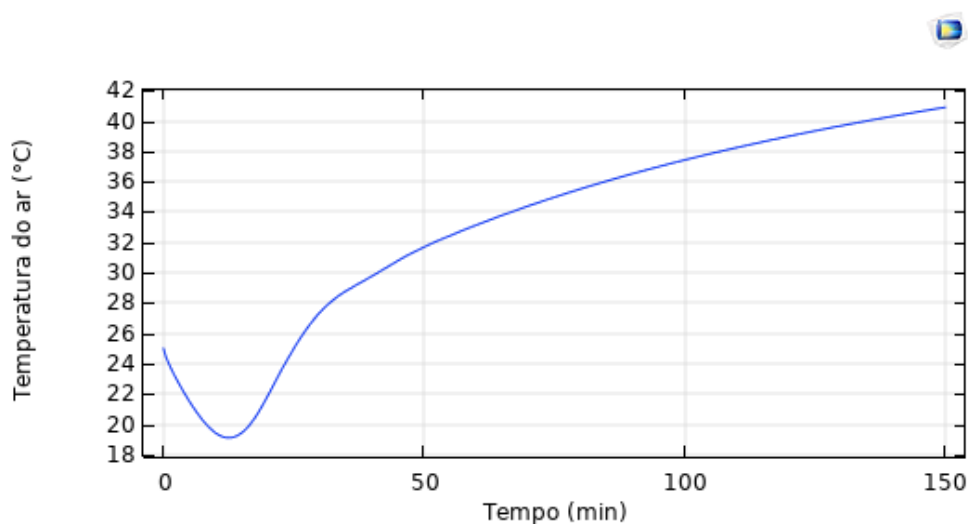
#### 4.2.3 Temperatura do ar

A temperatura do ar para as faixas do leito 8-9 e 17-18 centímetros é mostrada na figura 15.

**Figura 15 – Análise da temperatura do ar ao longo do tempo**



**(a) Intervalo entre 8 e 9 cm**



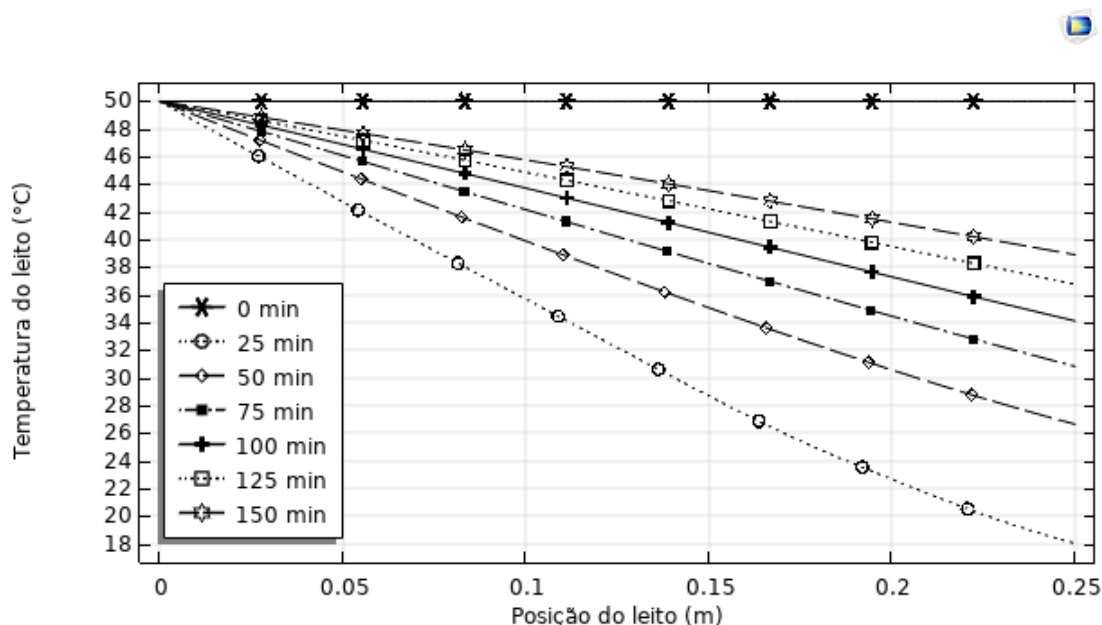
**(b) Intervalo entre 17 e 18 cm**

Fonte: Desenvolvido pela autora

A análise para a temperatura do ar ocorre de forma semelhante à análise da temperatura do leito.

A fim de melhor analisar a temperatura do ar, este parâmetro foi analisado ao longo do leito para diferentes tempos de simulação, como consta na figura 16.

Figura 16 – Análise da temperatura do ar ao longo do leito



Fonte: Desenvolvido pela autora

A análise da temperatura do ar ao longo do leito evidenciou que o ar de secagem é submetido a um intenso resfriamento do início da simulação. Este fenômeno ocorre porque as camadas superficiais do leito trocam calor com o ar - através de um processo convectivo - para evaporar a água contida nas sementes de arroz. Com o passar da simulação, o teor de umidade do leito é reduzido, diminuindo assim, a troca de calor com o ar de secagem. Por isto, as curvas relacionadas a maiores tempos de simulação apresentaram resfriamento mais ameno.

#### 4.3 ANÁLISES ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

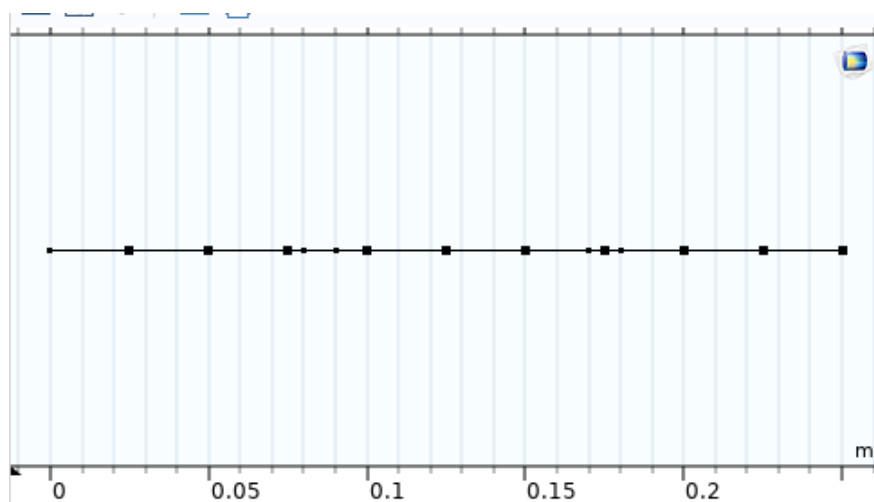
Para realizar as análises energética e exergética do modelo de secagem de arroz em leito fixo, tal qual proposto por Zare *et al.* (2006), no *software* COMSOL, é necessário definir qual modelo será submetido às análises, se o completo ou o simplificado. Neste caso, o modelo simplificado é escolhido.

Se faz necessário também, definir os valores da temperatura ambiente, e da área de entrada do ar de secagem. Em seu trabalho, Ranjbaran *et al.* (2014) adotaram os valores de :  $25^{\circ}\text{C}$  e  $1\text{ m}^2$ , respectivamente.

As análises energética e exergética, tal qual proposto por Ranjbaran *et al.* (2014), necessita que o leito seja discretizado, visto que é necessário calcular o termo fonte de alguns pontos. A malha tal qual utilizada na simulação até então, aumentara a complexidade da resolução das equações, pois apresenta um maior refinamento nas

faixas de 8 a 9 cm, e 17 e 18 cm. Tendo em vista que foi calculado o somatório dos termos, considera-se que a malha utilizada não altera o resultado obtido. Por isto, são inseridos alguns pontos na geometria do leito, como mostrado na figura 17.

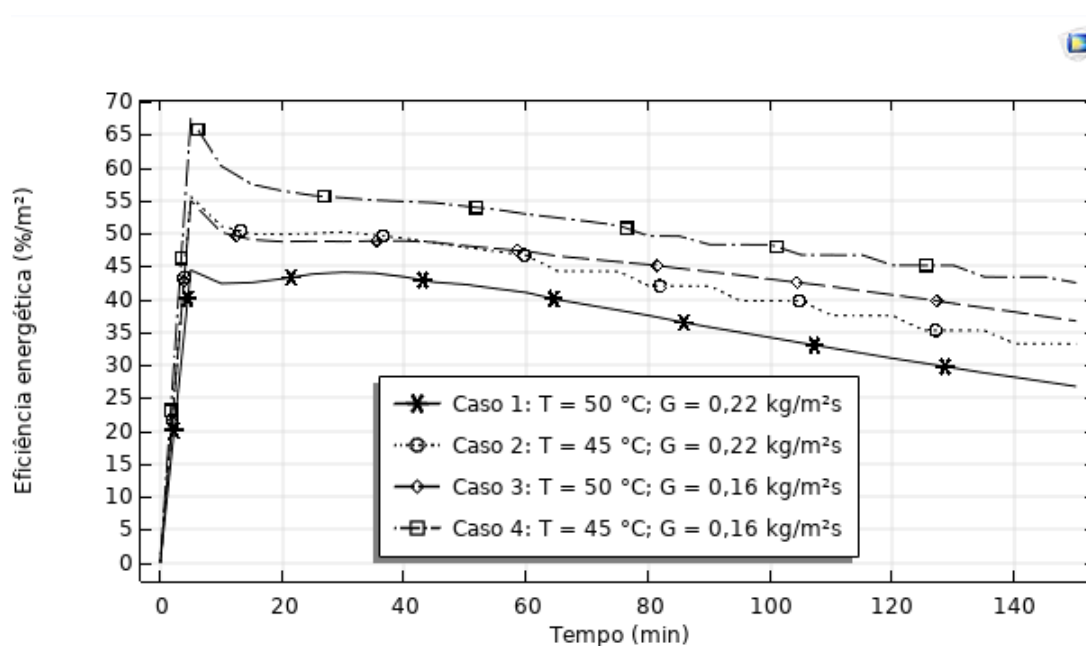
**Figura 17 – Dcretização do leito para análises**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Os resultados das eficiências energéticas específicas para os 4 casos propostos foram ilustrados na figura 18:

**Figura 18 – Eficiência energética específica para os casos estudados**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Numericamente, os resultados obtidos da eficiência energética específica para cada caso proposto pode ser exposto na tabela 12:

**Tabela 12 – Eficiência energética específica para cada caso proposto**

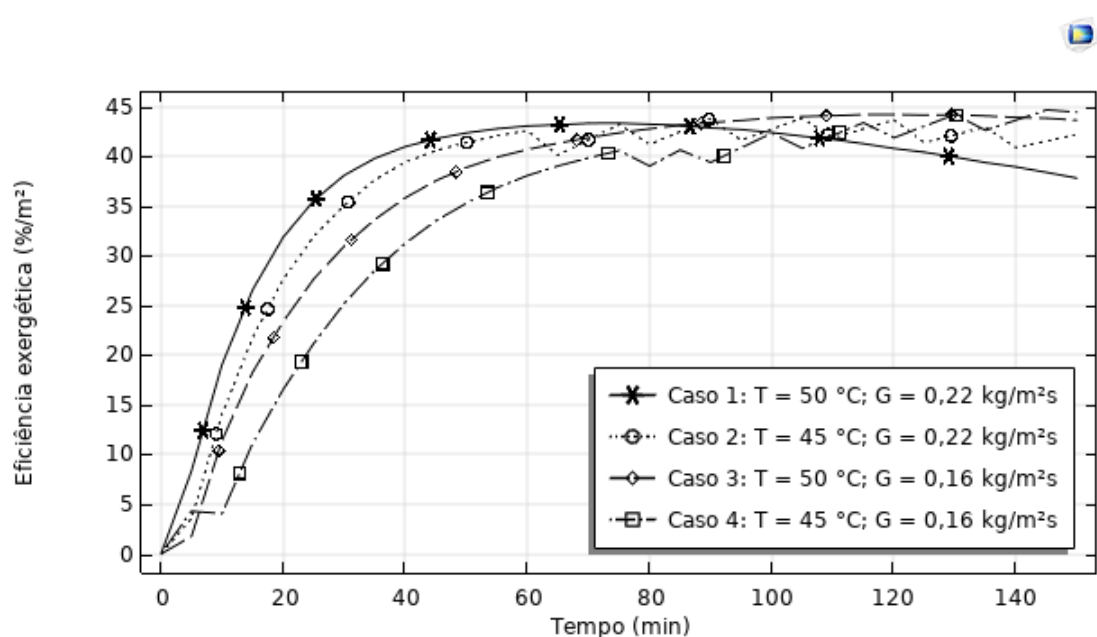
Tempo (min)	Caso 1 ( $\%/m^2$ )	Caso 2 ( $\%/m^2$ )	Caso 3 ( $\%/m^2$ )	Caso 4 ( $\%/m^2$ )
0	0	0	0	0
10	42	51	50	60
20	43	50	49	56
30	44	50	49	55
40	43	49	49	55
50	42	48	48	54
60	41	47	47	53
70	39	44	46	52
80	38	42	45	50
90	36	42	44	48
100	34	40	43	48
110	33	38	42	47
120	31	37	41	45
130	30	35	39	45
140	28	33	38	43
150	27	33	37	42

Fonte: Desenvolvido pela autora

Como pode ser observado, tanto graficamente quanto numericamente, a redução da temperatura do ar de secagem, bem como a redução da vazão de ar específica, aumentam a eficiência energética do sistema. Fisicamente, há um melhor aproveitamento da energia transferida aos grãos.

Os resultados das eficiências exergéticas específicas para os 4 casos propostos foram ilustrados na figura 19.

**Figura 19 – Eficiência exergética específica para os casos estudados**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Numericamente, os resultados obtidos para a eficiência exergética específica são mostrados na tabela 13:

**Tabela 13 – Eficiência exergética específica para cada caso proposto**

Tempo (min)	Caso 1 (%/m <sup>2</sup> )	Caso 2 (%/m <sup>2</sup> )	Caso 3 (%/m <sup>2</sup> )	Caso 4 (%/m <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0
10	19	14	11	4
20	32	28	23	17
30	38	35	31	25
40	41	39	36	31
50	42	41	39	35
60	43	43	41	38
70	43	42	42	40
80	43	41	43	39
90	43	44	43	39
100	42	43	44	42
110	42	42	44	42
120	41	44	44	42
130	40	42	44	44
140	39	41	44	44
150	38	42	44	44

Fonte: Desenvolvido pela autora

A fim de melhor analisar os resultados obtidos, foram feitas comparações entre os

casos, dois a dois. A influência da temperatura do ar de secagem pode ser claramente observada ao confrontar os casos que apresentam a mesma vazão específica e diferentes temperaturas: casos 1 e 2; e 3 e 4. Como resultado, foi observado que um aumento na temperatura do ar de secagem incrementa a eficiência exergética do processo de secagem de grãos de arroz em leito fixo. Esta tendência também foi observada por Sarker *et al.* (2015) em seu trabalho.

Os gráficos resultantes das análises energética e exergética apresentam a mesma tendência observada na literatura, principalmente no trabalho desenvolvido por Fortes (2004). Este autor apresentou a modelagem unidimensional, por isto esperava-se que os gráficos desenvolvidos para as análises energética e exergética apresentassem o mesmo comportamento.

Como Fortes (2004) simulou a secagem em um leito fluidizado, seus grãos estavam em contato direto com o ar quente de secagem em todas as suas superfícies, ao contrário do leito fixo presente neste trabalho, que apresentava contato direto com o ar de secagem apenas em uma das suas superfícies. Por isto, as eficiências obtidas por Fortes (2004) apresentaram valores maiores do que os expostos neste trabalho.

#### 4.4 OTIMIZAÇÃO

A otimização foi realizada tendo como base o modelo simplificado proposto por Zare *et al.* (2006). Inicialmente a otimização foi realizada mantendo-se a velocidade do ar de entrada fixa e variando a temperatura do ar de secagem. Em seguida, a vazão de ar quente foi mantida fixa e a temperatura do ar na entrada do secador foi variada. Por fim, ambos os parâmetros são variados simultaneamente.

##### 4.4.1 Otimização com temperatura do ar de secagem como restrição

Inicialmente a otimização foi feita mantendo a velocidade do ar de entrada fixa e variando apenas a temperatura do ar de secagem na entrada. O caso submetido a este teste foi o caso 1, com temperatura da entrada do ar quente fixa em 50 °C e teor de umidade inicial do leito fixo em 0,2469 *kg/kg*.

Os valores de velocidade do ar testados foram escolhidos tendo como base os limites para a fluidização, conforme consta no item 3.3.3. Dessa forma, as velocidades foram fixadas em 0.1, 0.2, 0.6, 1.1 e 1.6 m/s. As temperaturas que retornaram os valores ótimos para a eficiência exergética, para cada valor da velocidade do ar de entrada, contidas na tabela 14.

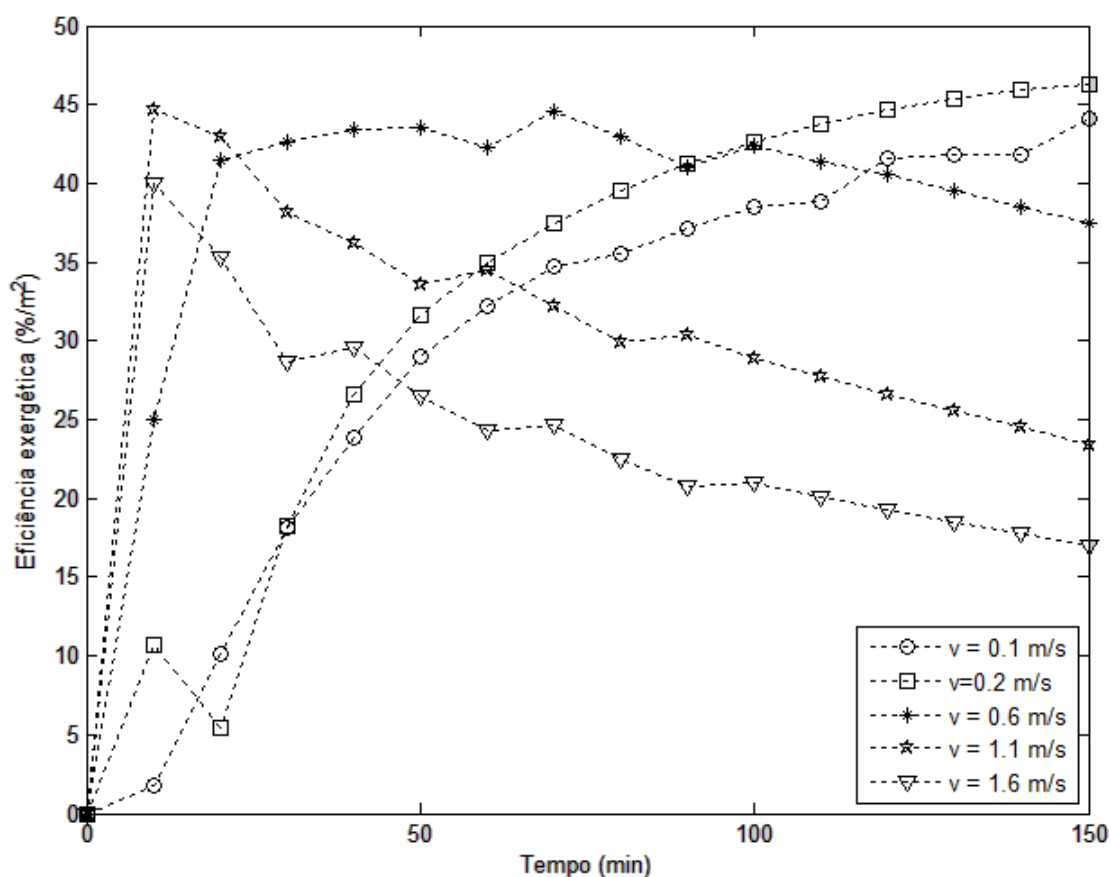
Tabela 14 – Velocidades do ar testadas e suas temperaturas de entrada de ar quente ótimas

Velocidade do ar de secagem ( $m/s$ )	Temperatura do ar quente ótima ( $^{\circ}C$ )
$v = 0.1$	$T_0 = 50$
$v = 0.2$	$T_0 = 36.63$
$v = 0.6$	$T_0 = 32$
$v = 1.1$	$T_0 = 32$
$v = 1.6$	$T_0 = 32$

Fonte: Desenvolvido pela autora

A fim de melhor comparar os resultados, a figura 20 mostra as eficiências exergéticas obtidas para cada velocidade do ar de entrada.

Figura 20 – Eficiência exergética ótima para velocidades do ar fixas



Fonte: Desenvolvido pela autora

Como pode ser observado, um aumento excessivo na velocidade do ar de secagem acarreta um decaimento na eficiência exergética. Dessa forma, por exemplo, para um tempo de simulação de 150 minutos, houve uma redução de 49,37 % na



eficiência exergética utilizando a velocidade do ar de 0,2 m/s para eficiência exergética utilizando a velocidade do ar de 1,1 m/s.

Este fenômeno ocorre pois a altas velocidades, o ar de secagem passa rapidamente pelo leito, não conseguindo, assim, trocar calor com o leito de forma satisfatória.

#### 4.4.2 Otimização com velocidade do ar de entrada como restrição

O próximo passo foi manter a temperatura do ar quente fixa e variar a velocidade do ar de secagem. Novamente, o caso escolhido para realizar o teste é o caso 1, com temperatura de entrada do ar de 50 °C.

Os valores de temperatura de entrada de ar quente testadas foram: 32 °C, 38 °C, 44 °C e 50 °C. Os valores de velocidade do ar que retornam os valores da eficiência exergética ótima estão dispostos na tabela 15, para cada temperatura do ar de entrada estudada.

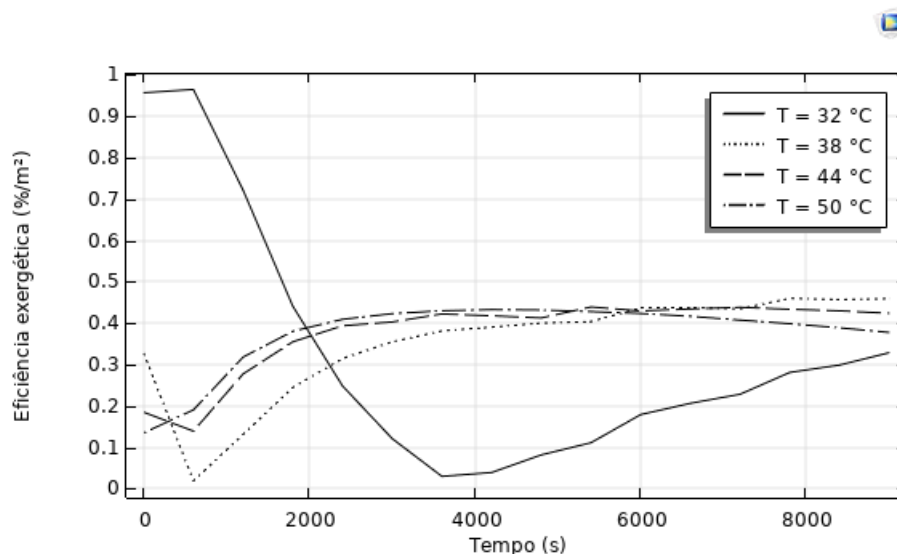
**Tabela 15 – Temperaturas de entrada de ar quente testadas e suas velocidades do ar ótimas**

Temperatura do ar quente (°C)	Velocidade do ar de secagem ótima ( $m/s$ )
$T_0 = 32$	$v = 0.1901$
$T_0 = 38$	$v = 0.1938$
$T_0 = 44$	$v = 0.1975$
$T_0 = 50$	$v = 0.2013$

Fonte: Desenvolvido pela autora

A fim de melhor visualizar a eficiência obtida para cada temperatura do ar de entrada fixo, os resultados obtidos com a otimização foram comparados na Figura 21.

**Figura 21 – Eficiência exergética ótima para velocidades do ar fixas**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Como pode ser visualmente verificado, a eficiência exergética apresenta uma queda, seguida de um crescimento acelerado, com valor máximo de 46,28 % obtido para um tempo de simulação de 150 minutos.

#### 4.4.3 Otimização com temperatura e velocidade do ar de secagem como restrições

Os quatro casos propostos por Zare *et al.* (2006) possuem valores diferentes para a umidade inicial do leite. Como as restrições da otimização envolvem apenas as grandezas temperatura do ar de entrada e velocidade do ar, faz-se necessário realizar a otimização da temperatura e velocidade do ar de entrada para os quatro casos propostos.

Os pontos ótimos de cada restrição para cada caso é exposto na tabela 16:

**Tabela 16 – Valores ótimos para as restrições, em cada caso**

	Temperatura inicial do ar (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)
Caso 1	36,63	0,19
Caso 2	37,37	0,19
Caso 3	36,57	0,19
Caso 4	37,22	0,19

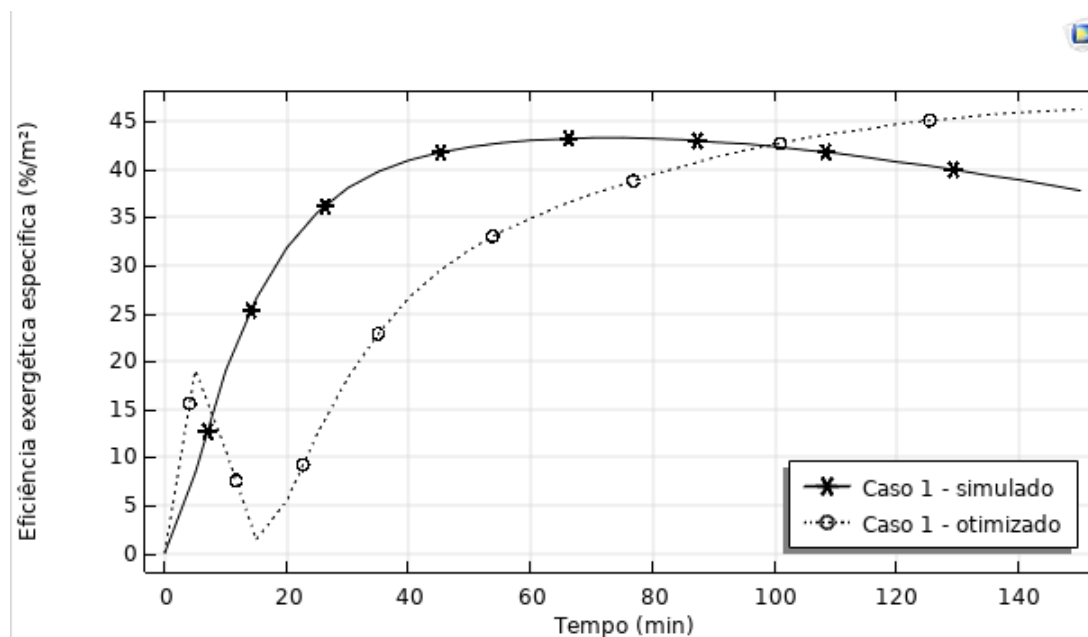
Fonte: Desenvolvido pela autora

Embora a velocidade do ar de secagem ótima tenha sido praticamente a mesma para os quatro casos, a temperatura inicial do ar apresentou uma pequena variação.

Isto se deve à pequena variação da umidade do leito inicial: quanto maior a umidade inicial, maior a temperatura inicial do ar de secagem.

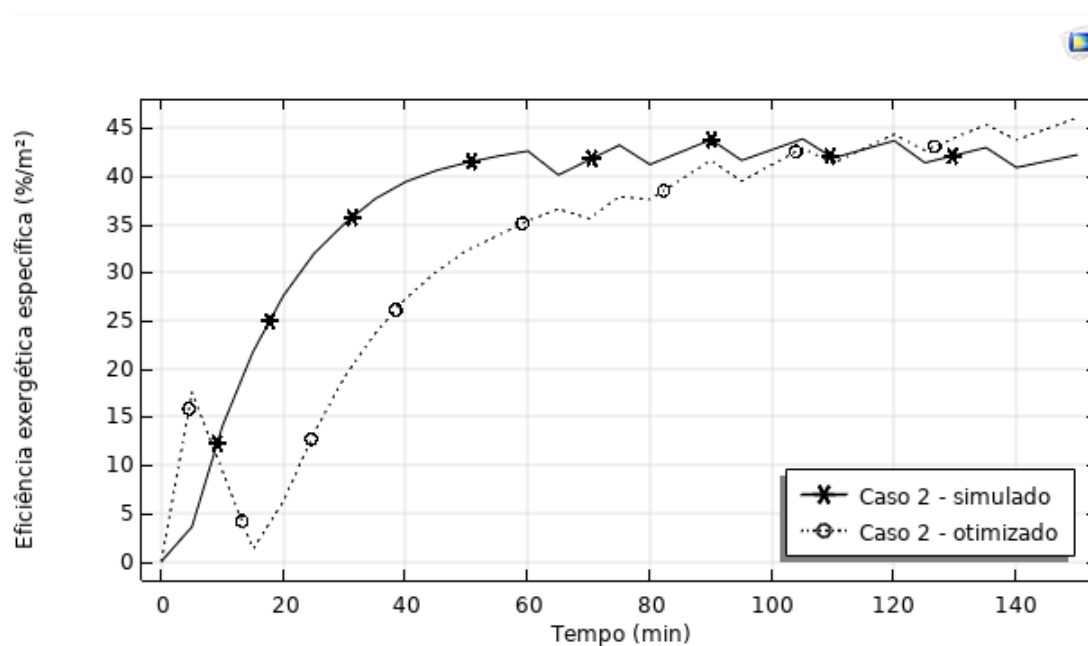
Os resultados ótimos são comparados com os resultados obtidos anteriormente na seção 4.3, conforme apresentados nas figuras 22 a 25.

**Figura 22 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 1**



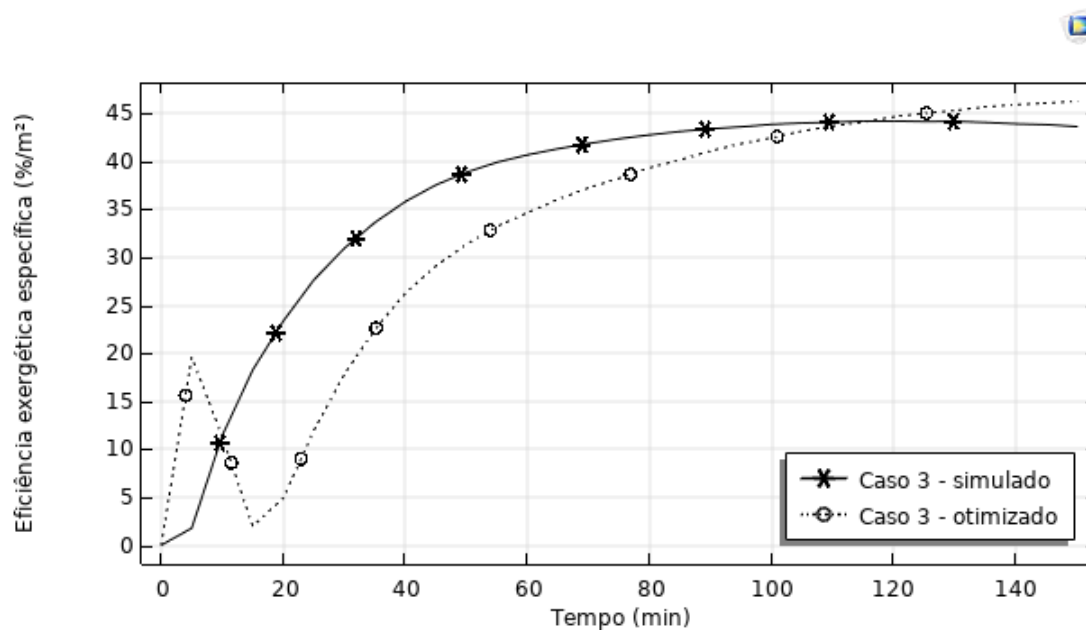
Fonte: Desenvolvido pela autora

**Figura 23 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 2**



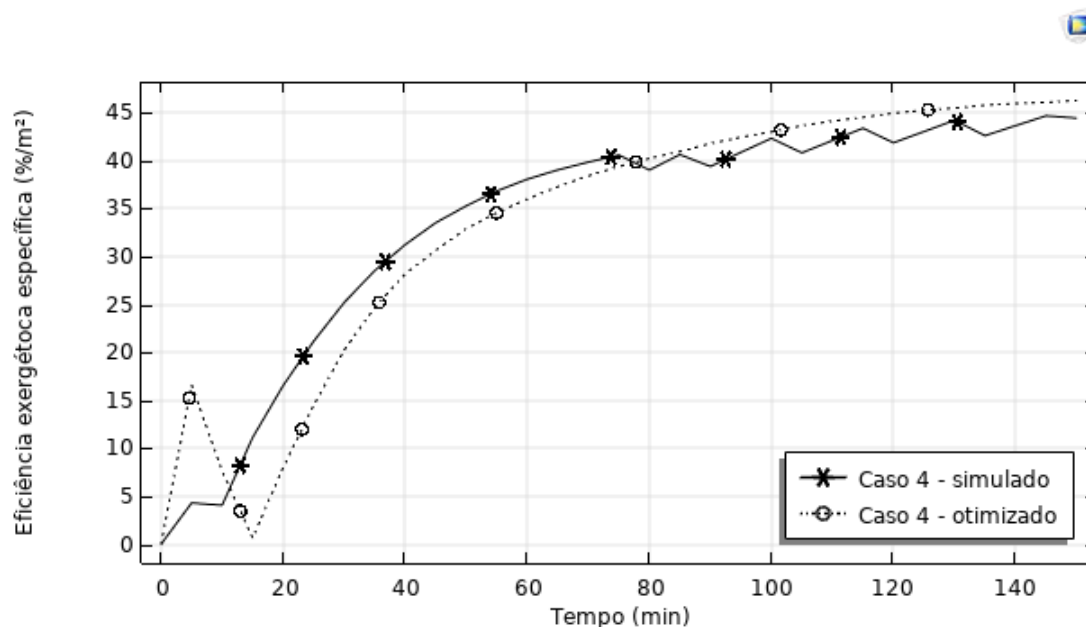
Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 24 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 3



Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 25 – Comparação entre eficiência exergética específica simulada e otimizada - caso 4



Fonte: Desenvolvido pela autora

Na curva presente no gráfico da análise exergética específica verifica-se um comportamento de subida, seguida por uma tendência à descida. Fisicamente, este comportamento é facilmente explicado: no início do processo a eficiência exergética específica é baixa pois o calor transferido ao grão deve ser utilizado para evaporar

a umidade contida em seu interior. Já nas etapas finais do processo de secagem, a umidade residual no interior do grão é muito pequena, tornando o processo menos eficaz para grandes tempos de secagem.

Também foi constatado que a otimização da eficiência exergética específica, além de aumentar o valor máximo alcançado, deslocou o pico da curva para a direita, tornando a eficiência exergética maior para maiores tempos de simulação.

Além disso, também foi observado que, para todos os casos otimizados, houve um pequeno pico no início da simulação. Este pico coincidiu com o período de maior instabilidade do processo: nele, grande parte do calor transferido ao grão foi utilizado para evaporar a umidade contida no interior dos grãos de arroz. Neste período, a temperatura do ar, bem como a temperatura do leito, apresentam uma queda expressiva em módulo, justificando o comportamento do gráfico otimizado.

A fim de comparar a melhora obtida com a otimização para cada caso estudado, é elaborada a tabela 17.

**Tabela 17 – Valores simulados e otimizados de eficiência exergética - caso 1**

Caso	Máximo simulado ( $\%/m^2$ )	Máximo otimizado ( $\%/m^2$ )	Diferença ( $\%/m^2$ )
1	43,32	46,28	2,96
2	43,84	46,05	2,21
3	44,19	46,26	2,07
4	44,66	46,25	1,59

Fonte: Desenvolvido pela autora

O caso que apresentou a melhora mais significativa foi o caso 1, com 2.96 % por metro quadrado, enquanto que o caso que apresentou o menor incremento de eficiência exergética específica com a otimização foi o caso 4, com 1.59 % por metro quadrado. Embora possa parecer pouco significativo, este aumento na eficiência exergética do modelo é considerável, visto que a produção de grãos de arroz nacional é da ordem de toneladas.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o processo de secagem de grãos de arroz em leito fixo, via *software* COMSOL, utilizando o método dos elementos finitos. O modelo adotado para este estudo foi aquele utilizado por Zare *et al.* (2006).

As análises energética e exergética foram realizadas em função da geometria do leito. A análise energética foi mais efetiva no início da simulação, e apresentou vertiginosa queda no decorrer da simulação, para todos os casos estudados. A análise exergética também apresenta um ponto ótimo, seguido de queda, ou tendência à queda. Ambos os comportamentos estão de acordo com aqueles presentes na literatura.

A otimização foi realizada tomando como base o modelo simplificado, via *software* COMSOL, utilizando a técnica de elementos finitos. Foi encontrado um valor ótimo para a velocidade do ar de  $0,19 \text{ m/s}$ , para os quatro casos estudados. Já a temperatura do ar de entrada ótima variou de acordo com o caso estudado: de  $36,57^\circ\text{C}$  a  $37,37^\circ\text{C}$ . Esta variação se deve à diferença da umidade do leito inicial, em cada caso: aqueles que apresentaram maiores umidades iniciais também obtiveram maiores temperaturas ótimas para o ar de entrada. Também foi observado que os gráficos obtidos para os modelos otimizados apresentaram um pequeno pico no início da simulação, no período em que a maior parte do calor obtido pelo grão é utilizado para evaporar a umidade. O caso 1 - temperatura do ar de secagem de  $50^\circ\text{C}$  e vazão específica de  $0,22 \text{ kg/m}^2\text{s}$  - foi o que obteve uma melhora mais significativa para a eficiência exergética específica, de 2,96 % por metro quadrado, enquanto que o caso 4 - temperatura do ar de secagem de  $45^\circ\text{C}$  e vazão específica de  $0,16 \text{ kg/m}^2\text{s}$  - foi o que obteve o menor incremento, de apenas 1,59 % por metro quadrado. Embora possa aparentemente ser considerada pequena, esta melhora é significativa ao ser implementada em grandes produções. Por fim, foram realizados testes com diferentes umidade do ar de entrada, obtendo-se alterações significativas, de até 12,6 % por metro quadrado.

Uma boa sugestão para trabalhos futuros é a otimização do modelo para a eficiência energética.

## REFERÊNCIAS

- AMANTÉA, R. P.; FORTES, M.; MARTINS, J. H.; FERREIRA, W. R. Numerical simulation techniques for optimizing thermodynamic efficiencies of cereal grain dryers. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 31, n. 6, p. 672–683, 2013.
- B. GAO; M. B., G. L. Y. D. K. W. M. J. Y. Heat and mass transfer during hot-air drying of rapeseed: Cfd approach and evaluation. **INMATEH-Agricultural Engineering**, v. 50, n. 3, p. 73–82, 2016.
- BALBAY, A.; SAHIN, O.; ULKER, H. Modeling of convective drying kinetics of pistachio kernels in a fixed bed drying system. **Thermal Science**, v. 17, n. 3, p. 839–846, 2013.
- BORGES, P. A. P. **Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos**. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BORTOLAIA, L. A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1992.
- COMSOL do Brasil. In: OPTIMIZE Engineering Designs with the Optimization Module. Brasil: COMSOL, 2017. Disponível em: <<https://br.comsol.com/optimization-module>>. Acesso em: 25 ago. 2018.
- CONAB. **Grãos - séries históricas**. 2019. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/safras/safra-serie-historica>>. Acesso em: 13 agos. 2019.
- CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; CAMPOS, S. d. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 575–581, 2011.
- DEFENDI, R.; SILVA, R. da; PARAÍSO, P.; JORGE, L. M. Simulação da secagem periódica de feijão em leito fixo. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 12317–12324, 2015.
- DUBEY, O.; PRYOR, T. A user oriented simulation model for deep bed solar drying of rough rice. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 9, n. 1-4, p. 695–699, 1996.
- ELGAMAL, R.; RONSSE, F.; PIETERS, J. Modeling deep-bed grain drying using comsol multiphysics. In: **COMSOL Conference 2013**. [S.l.: s.n.], 2013.
- ELGAMAL, R. A.; KISHK, S. S.; ELMASRY, G. M. Validation of cfd models for the deep-bed drying of rice using thermal imaging. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 161, p. 135–144, 2017.

FAN, J.; SIEBENMORGEN, T.; GARTMAN, T.; GARDISSER, D. Bulk density of long-and medium-grain rice varieties as affected by harvest and conditioned moisture contents. **Cereal Chemistry**, Wiley Online Library, v. 75, n. 2, p. 254–258, 1998.

FERRARI-FILHO, E. **Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FORTES, M. Second-law modeling of deep bed drying processes with a simulation study of wheat air-recirculated fluidized-bed drying. In: **Drying 2004, Proceedings of the 14th International Drying Symposium IDS 2004**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 18–32.

FREGOLENTE, L.; SANTOS, O.; JORGE, L. Estimativa das propriedades térmicas efetivas de grãos em um secador de leito fixo. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, SciELO Brasil, v. 24, n. 2, p. 270–276, 2004.

HEMIS, M.; BETTAHAR, A.; SINGH, C.; BRUNEAU, D.; JAYAS, D. An experimental study of wheat drying in thin layer and mathematical simulation of a fixed-bed convective dryer. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 27, n. 10, p. 1142–1151, 2009.

INABA, H.; SYAHRUL, H.; HORIBE, A.; HARUKI, N. Heat and mass transfer analysis of fluidized bed grain drying. **Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University**, Faculty of Engineering, Okayama University, v. 41, n. 1, p. 52–62, 2007.

ISTADI, I.; SITOMPUL, J. P. A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 20, n. 6, p. 1123–1142, 2002.

JOKINIEMI, H. T.; AHOKAS, J. M. Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 121, p. 209–220, 2014.

KHANALI, M.; BANISHARIF, A.; RAFIEE, S. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice. **Heat and Mass Transfer**, Springer, v. 52, n. 11, p. 2541–2549, 2016.

LOPES, D. C.; NETO, A. J. S.; SANTIAGO, J. K. Comparison of equilibrium and logarithmic models for grain drying. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 118, p. 105–114, 2014.

MALEKJANI, N.; JAFARI, S. M. Simulation of food drying processes by computational fluid dynamics (cf); recent advances and approaches. **Trends in Food Science & Technology**, Elsevier, 2018.

MENEZES, N. L.; CICERO, S. M.; VILLELA, F. A.; BORTOLOTTTO, R. P. Using x rays to evaluate fissures in rice seeds dried artificially. **Revista Brasileira de Sementes**, SciELO Brasil, v. 34, n. 1, p. 70–77, 2012.

MOAVENI, S. Finite element analysis with ansys. **Theory and Application with Ansys**, p. 189–215, 1999.

MOHAN, V. C.; TALUKDAR, P. Experimental studies for convective drying of potato. **Heat Transfer Engineering**, Taylor & Francis, v. 35, n. 14-15, p. 1288–1297, 2014.



NAGHAVI, Z.; MOHEB, A.; ZIAEI-RAD, S. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 51, n. 2, p. 258–264, 2010.

OKO, C.; NNAMCHI, S. Coupled heat and mass transfer in a solar grain dryer. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 31, n. 1, p. 82–90, 2013.

RANJBARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. Cfd simulation of deep-bed paddy drying process and performance. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 32, n. 8, p. 919–934, 2014.

RODRIGUES, E.; SILVA, J.; SOUZA, C.; LACERDA-FILHO, A.; CHAVES, M. Simulação da secagem de abacaxi em fatias em secador de leito fixo. **Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG**, v. 16, n. 4, p. 381–193, 2008.

RUMSEY, T.; ROVEDO, C. Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Elsevier, v. 40, n. 4, p. 355–362, 2001.

SADEGHI, M.; ARAGHI, H. A.; HEMMAT, A. Physico-mechanical properties of rough rice (*oryza sativa* L.) grain as affected by variety and moisture content. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 12, n. 3-4, p. 129–136, 2010.

SARKER, M. S. H.; IBRAHIM, M. N.; AZIZ, N. A.; PUNAN, M. S. Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy. **Energy**, Elsevier, v. 84, p. 131–138, 2015.

SOUZA, G. F.; MIRANDA, R. F.; BARROZO, M. A. Soybean (*glycine max* L. merrill) seed drying in fixed bed: Process heterogeneity and seed quality. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 33, n. 14, p. 1779–1787, 2015.

SOUZA, J. L. F. **Simulação de secador cilíndrico de grãos co fluxo radial e axial de ar**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

SRIVASTAVA, V.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. **Energy, Conversion and Management**, Elsevier, v. 43, n. 13, p. 1689–1708, 2002.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. de; SILVA, L. C. da; OLIVEIRA, G. H. H. de; SANTOS, F. L. Linsec-programa computacional para modelagem e simulação de sistemas de secagem de grãos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 664–673, 2012.

WANG, G.; SINGH, R. P. Single layer drying equation for rough rice. **Paper-American Society of Agricultural Engineers**, 1978.

ZARE, D.; MINAEI, S.; ZADEH, M. M.; KHOSHTAGHAZA, M. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 47, n. 18-19, p. 3241–3254, 2006.

## APÊNDICE A – INSERÇÃO DO MODELO DE SECAGEM DE ARROZ EM LEITO FIXO NO *SOFTWARE* COMSOL

Este anexo objetiva detalhar o código inserido para a simulação do modelo de secagem de arroz em leito fixo retirado da literatura.

Na aba de *Global Definitions* deve-se definir os parâmetros (*Parameters 1*), aquelas grandezas que não variam ao longo da simulação, conforme disposto na Figura 26.

Figura 26 – Parâmetros inseridos no modelo proposto por Zare *et al.* (2006)

Name	Expression	Value	Description
M0	.2469	0.2469	umidade inicial do grão
H0	0.01	0.01	umidade inicial do ar
T0	50 [C]	50 C	temperatura inicial do ar
Theta0	25[C]	25 C	temperatura inicial do grão
G	0.22 [kg/m <sup>2</sup> /s]	0.22 kg/(m <sup>2</sup> ·s)	vazão mássica
A1	0.2755	0.2755	constante
r0	0.00457 [m]	0.00457 m	raio da partícula
B1	-0.34	-0.34	constante
as	2361 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	2361 1/m	área superficial específica
cw	4186 [J/kg/K]	4186 J/(kg·K)	calor específico da água

Fonte: Desenvolvido pela autora

Na aba *Component 1*, em *Definitions*, define-se as variáveis (*Variables 1*), que devem ser alteradas de acordo com as condições da temperatura e umidade do ar e dos grãos, conforme consta na Figura 27.

Figura 27 – Variáveis inseridas no modelo proposto por Zare *et al.* (2006)

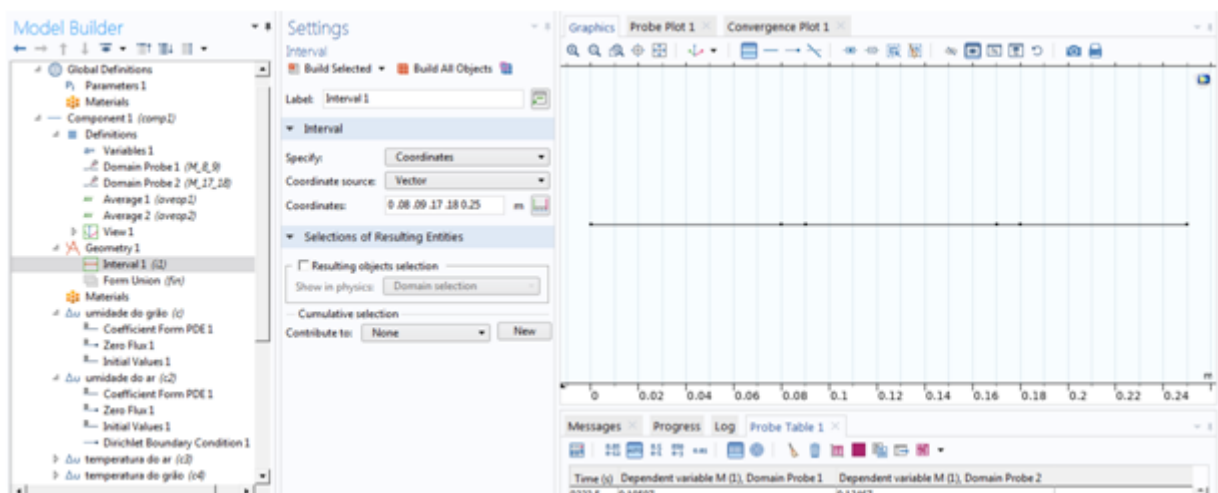
Name	Expression	Unit	Description
Me	$0.001 \cdot (A/B)^C$		umidade do grão no equilíbrio
A	$-\log(1-RH) \cdot Tabs$		constante
Tab	$T + 273.16$		temperatura absoluta
B	$2.667 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - Tabs/641.7)^{-23.438}$		constante
C	$1/(4e5 \cdot Tabs^{(-2.1166)})$		constante
RH_verda...	$101.3 \cdot H / (0.62189 \cdot Pvs + H \cdot Pvs)$		umidade relativa
Pvs	$0.1 \cdot \exp(27.0214 - 6887 / Tabs - 5.31 \cdot \log(Tabs/273.16))$		pressão de saturação
X	$0.01579 + 0.0001746 \cdot T - 0.01413 \cdot RH$		constante
Y	$0.6545 + 0.002425 \cdot T + 0.078867 \cdot RH$		constante
ca	$1009.26 - 0.0040403 \cdot T + 6.1759 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 4.097 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$		calor específico do ar
cv	$1.883 \cdot 10^3 - 1.6737 \cdot 10^{-1} \cdot T + 8.4386 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 2.6966 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$		calor específico do vapor de água
mia	$1.691 \cdot 10^{-5} + 4.984 \cdot 10^{-8} \cdot T - 3.187 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 1.319 \cdot 10^{-14} \cdot T^3$		viscosidade do ar
cp	$1109 + 4186 \cdot M$		calor específico da umidade do grão
ha	$A1 \cdot ca \cdot G \cdot (2 \cdot r0 \cdot G / mia)^{B1} \cdot as$		coeficiente de transferência de calor do leito do grão
hv	$2.503 \cdot 10^6 - 2.386 \cdot 10^3 \cdot (Tabs - 273.16)$		calor latente de vaporização
rhop	$4.44 \cdot M + 504.7$		densidade da partícula
RH	$\max(\min(RH\_verdadeiro, 99), 0.01)$		

Fonte: Desenvolvido pela autora

Para o modelo de secagem de grãos de arroz que leva em consideração os termos temporais das equações de temperatura e umidade do ar, deve-se acrescentar apenas a porosidade do ar ( $\epsilon$ ), nos parâmetros, e a densidade do ar ( $\rho_a$ ), em variáveis.

A geometria do leito deve ser definida, ainda em *Component 1*, de acordo com a figura 28.

Figura 28 – Geometria definida

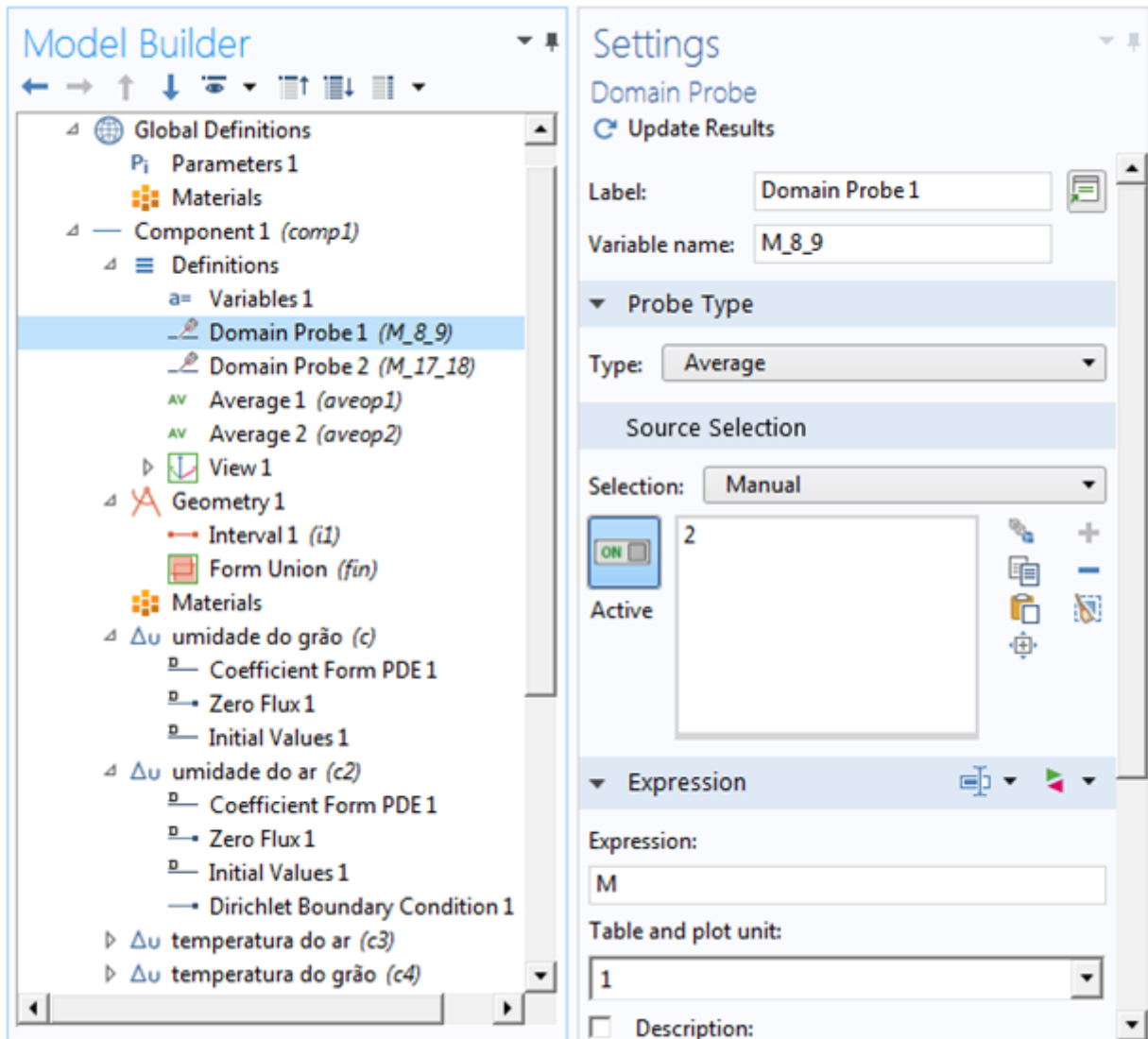


Fonte: Desenvolvido pela autora

*Domain Probe 1*, *Domain Probe 2*, *Average 1* e *Average 2* devem ser inseridos (como consta nas figuras 29 a 33) a fim de possibilitar o cálculo da umidade média nos

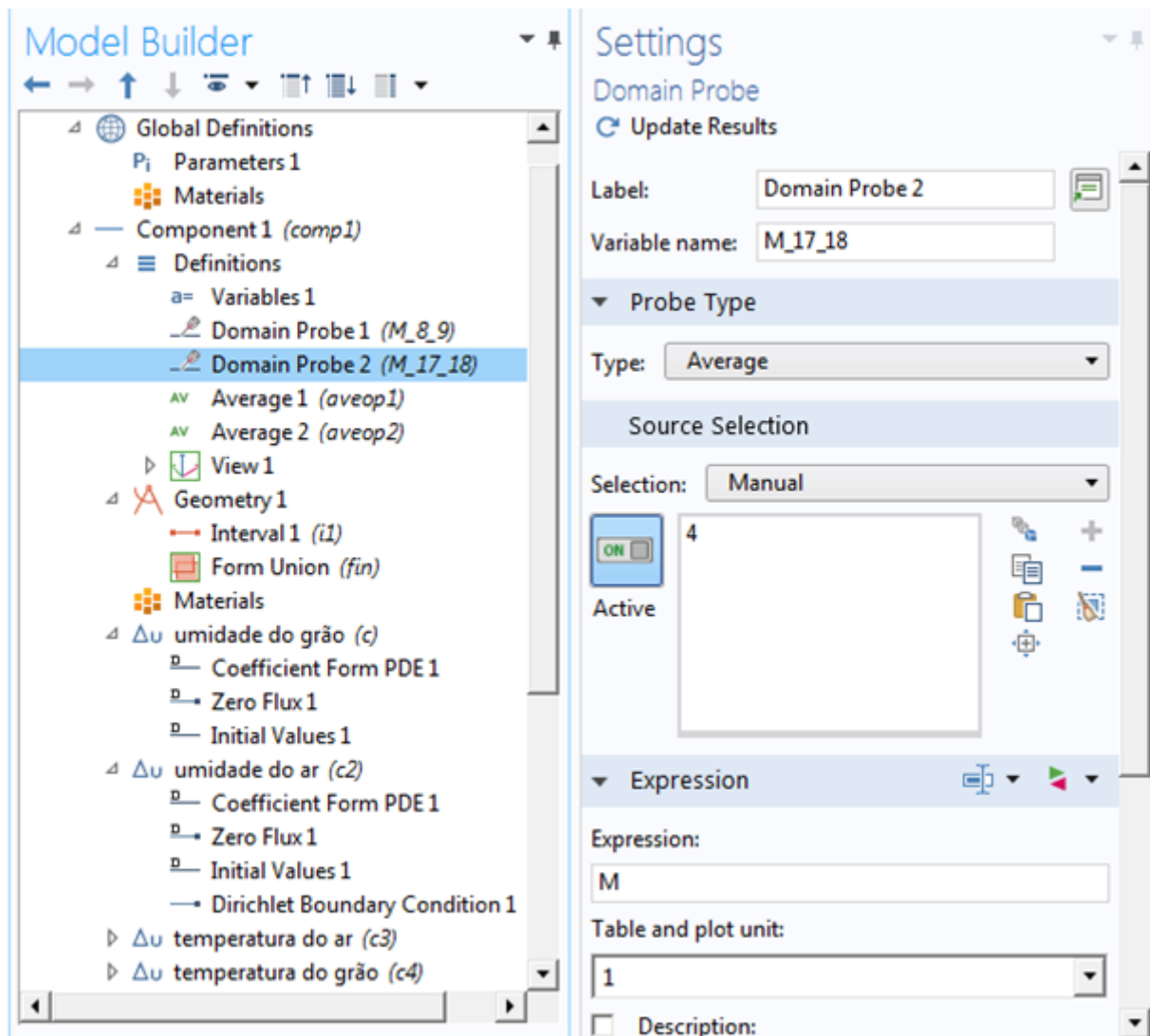
intervalos definidos de 8 a 9 cm e 17 a 18 cm, para que seja possível comparar os resultados obtidos com aqueles da literatura.

Figura 29 – *Domain Probe 1* do modelo de secagem de arroz



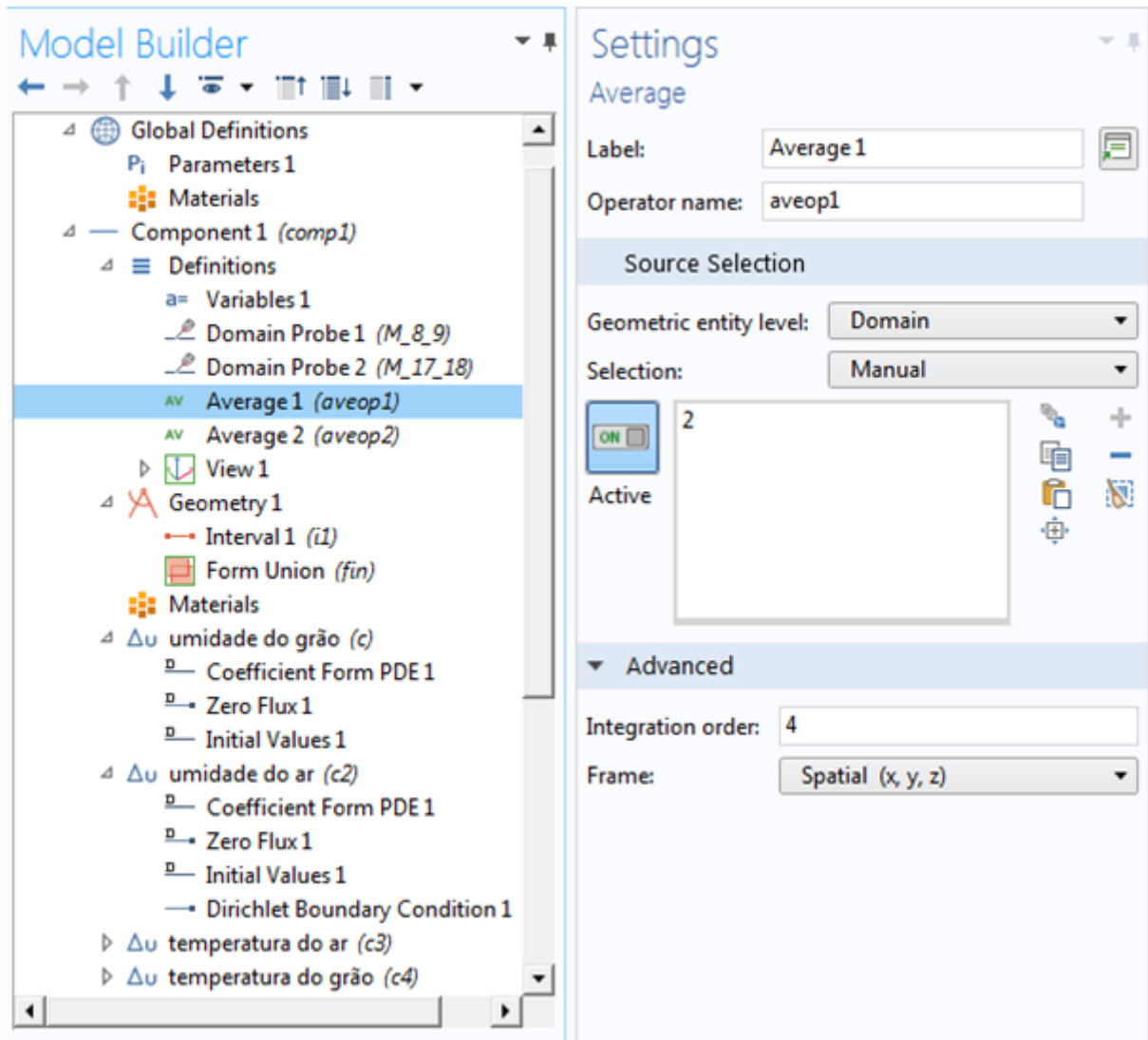
Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 30 – *Domain Probe 2* do modelo de secagem de arroz



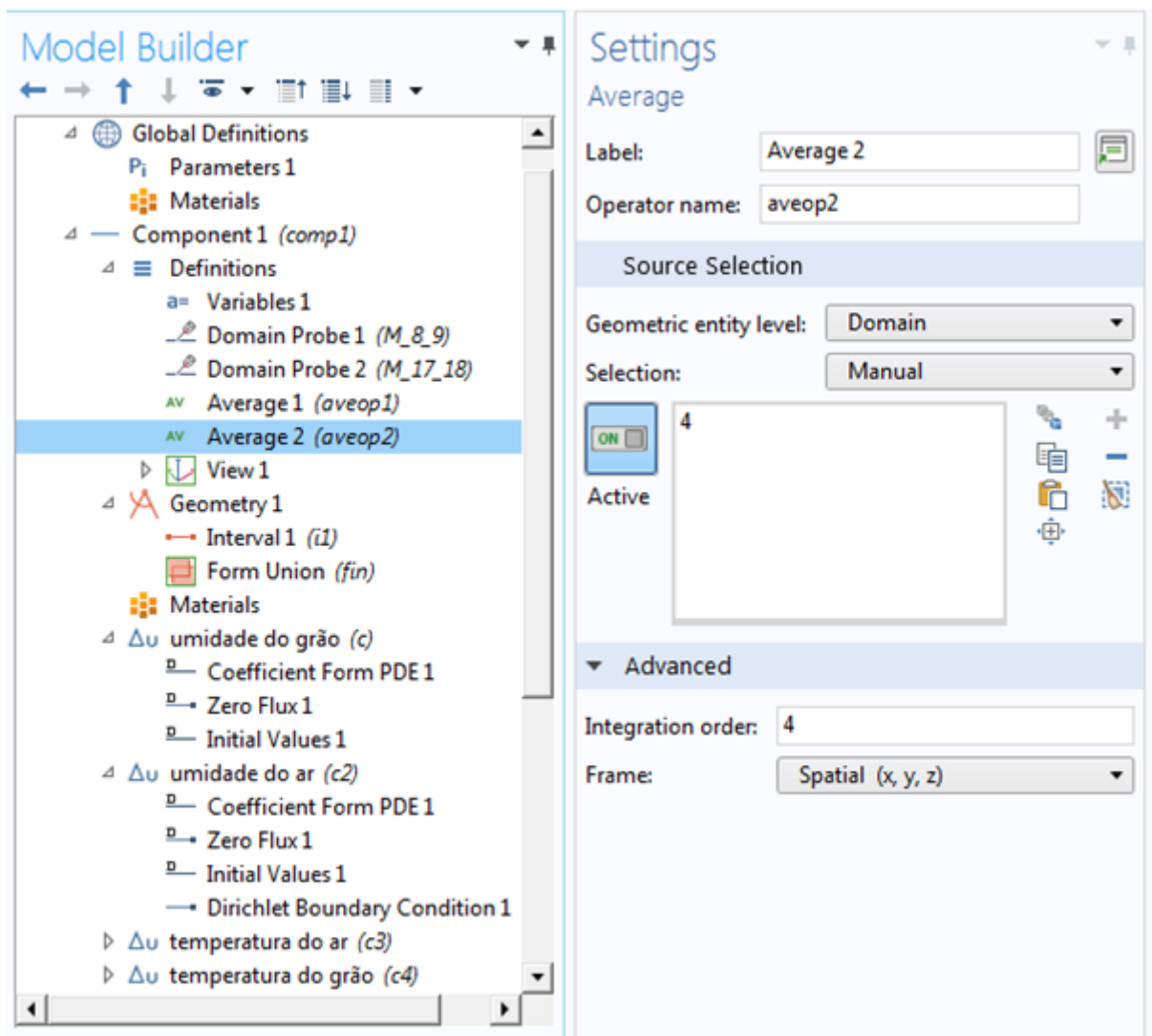
Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 31 – Average 1 do modelo de secagem de arroz



Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 32 – Average 2 do modelo de secagem de arroz

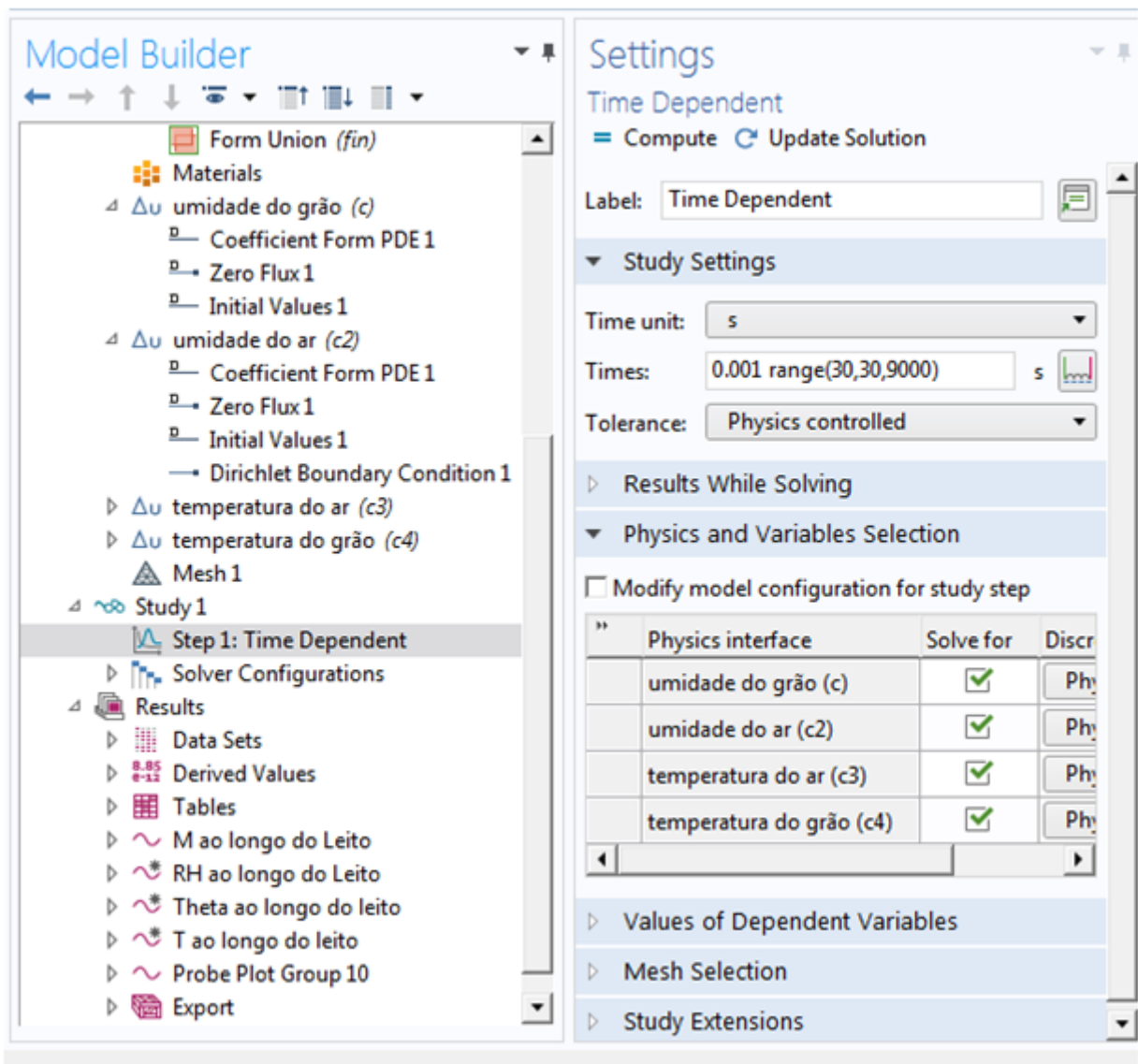


Fonte: Desenvolvido pela autora

Os coeficientes das equações devem ser inseridos de acordo com as tabelas 4 ou 5, devendo-se apenas observar que as equações relativas a temperatura e umidade do ar devem conter a condição de contorno, aqui expressa por *Dirichlet Boundary Condition 1*.

Por fim, na aba *Study 1*, clica-se em *Step 1: Time Dependent* e define-se o intervalo de tempo para o qual a simulação ocorrerá, conforme consta na figura 33.

Figura 33 – Passo no tempo definido para o modelo de secagem de arroz



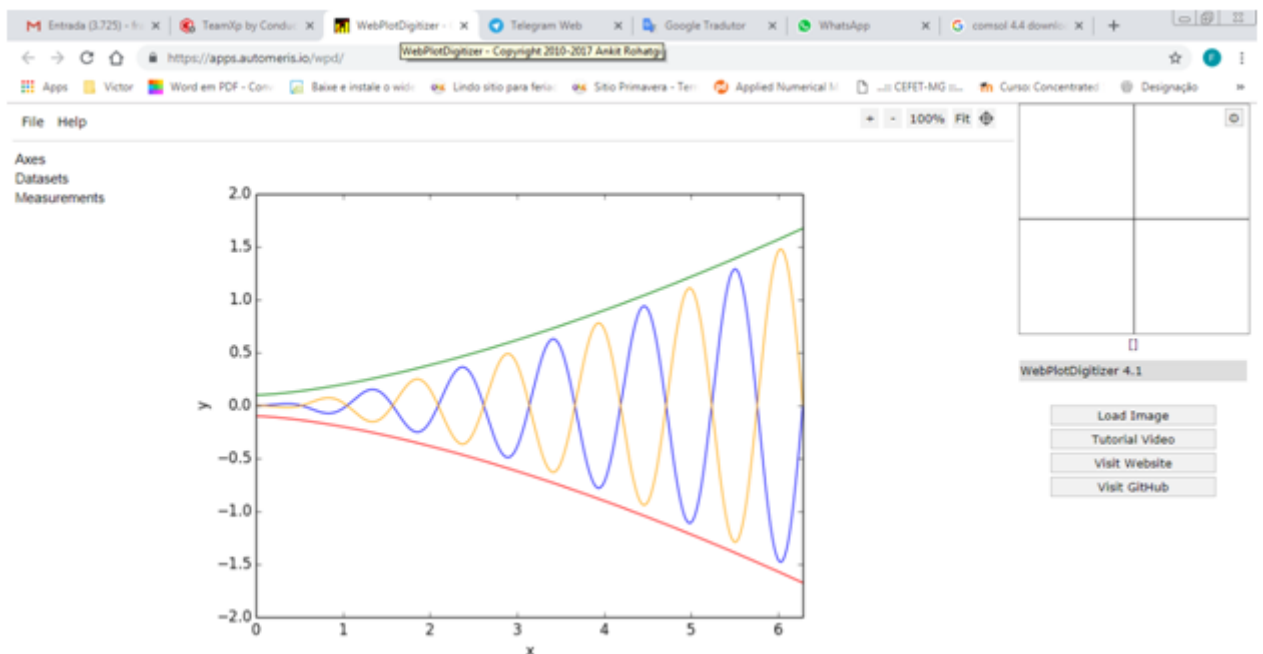
Fonte: Desenvolvido pela autora



## APÊNDICE B – RETIRADA DOS DADOS EXPERIMENTAIS DA LITERATURA

A fim de retirar os dados experimental e numérico da literatura, deve-se acessar o aplicativo *Web Plot Digitalizer*, através do endereço eletrônico <<https://apps.automeris.io/wpd/>>. Ao acessar o endereço, é nos mostrada a figura 34:

Figura 34 – Tela inicial do aplicativo *online* de retirada de dados à partir de imagens

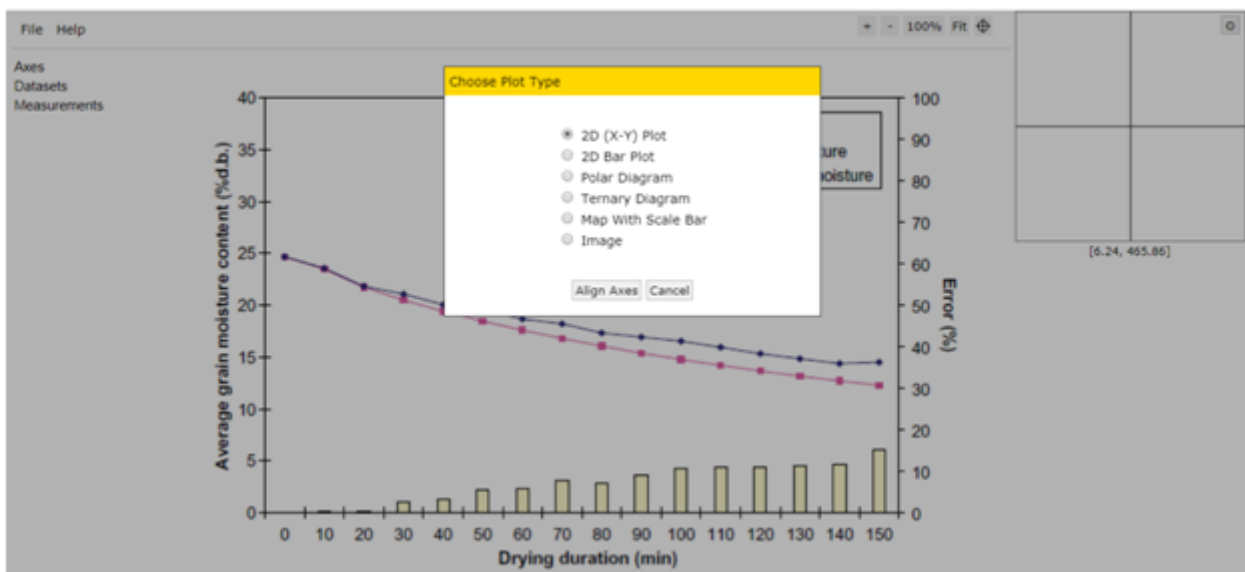


Fonte: Desenvolvido pela autora

Em seguida, deve-se colar a imagem da qual quer-se retirar os gráficos. Caso a imagem já esteja gravada no disco rígido da máquina, deve-se clicar em *LOAD IMAGE*. Caso a imagem não esteja gravada, basta colá-la.

Ao introduzir a imagem, será necessário definir qual o tipo de gráfico a ser utilizado: se cartesiano, de barras, polar, etc... Para tal, nos é mostrada a tela, conforme a figura 35:

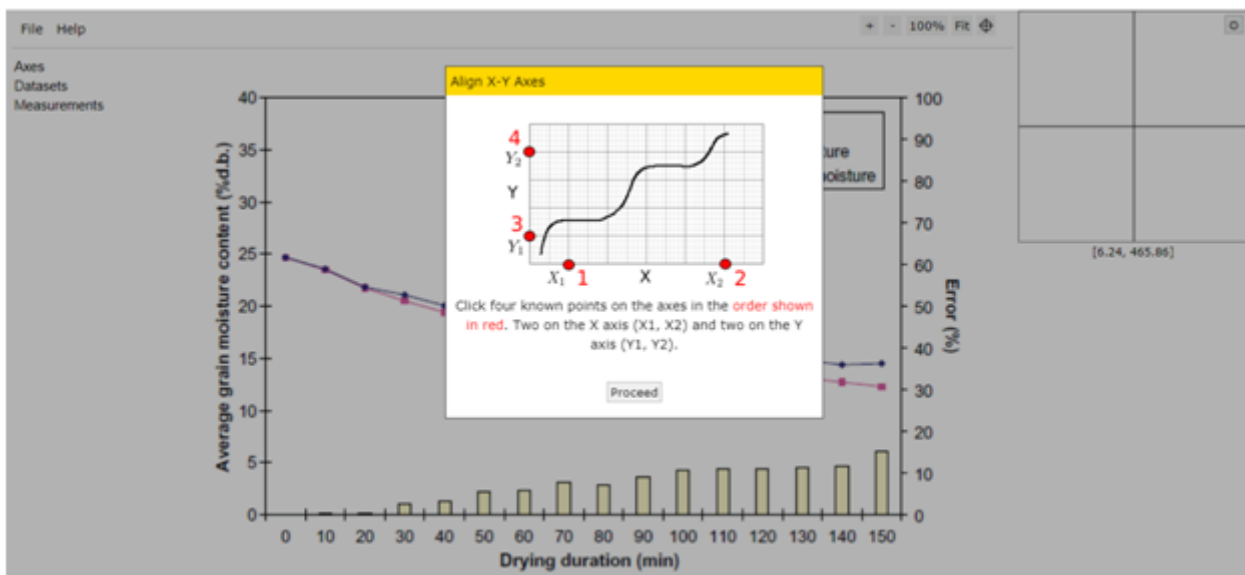
**Figura 35 – Definição do tipo de gráfico a ser introduzido**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Neste ponto, deve-se observar que a imagem escolhida é mostrada ao fundo, sendo que agora está na hora de alinhar os eixos. Para tal, selecionamos o tipo de gráfico introduzido (no caso da figura escolhida é 2D (X-Y) Plot) e clicamos em *ALIGN AXES*. As instruções para alinhar os eixos é mostrada na figura 36:

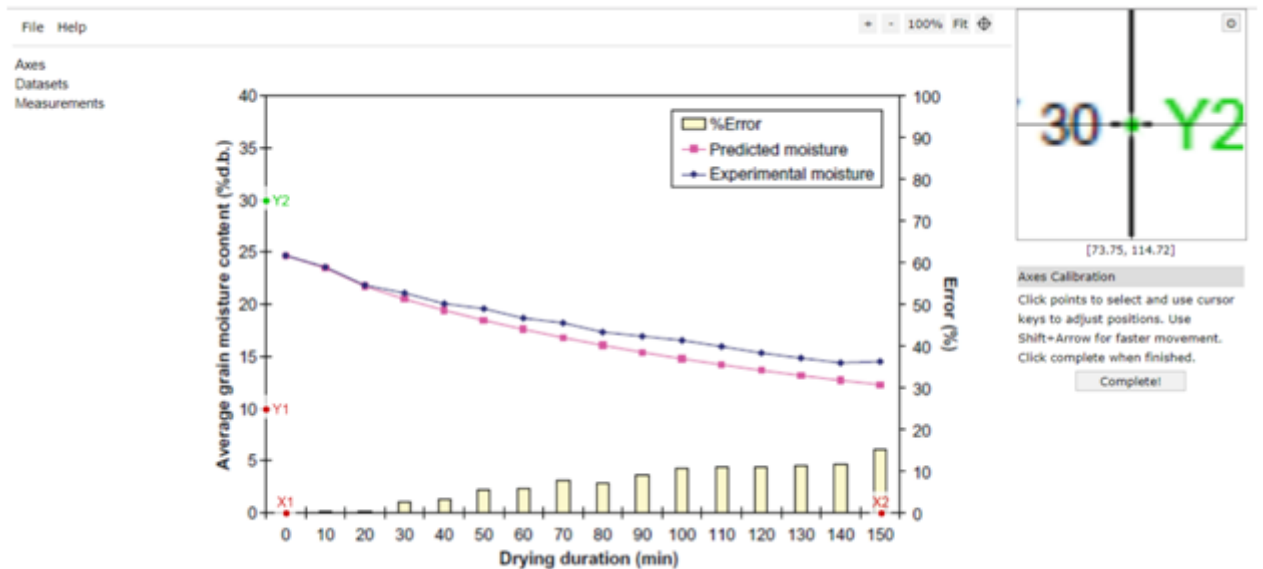
**Figura 36 – Procedimentos para alinhar os eixos do gráfico carregado**



Fonte: Desenvolvido pela autora

Como é mostrado, deveremos escolher quatro pontos na imagem, na seguinte ordem: X1, X2, Y1 e Y2. Para tal, basta clicar em *PROCEED* e escolher os pontos a serem definidos, como mostrado na figura 37:

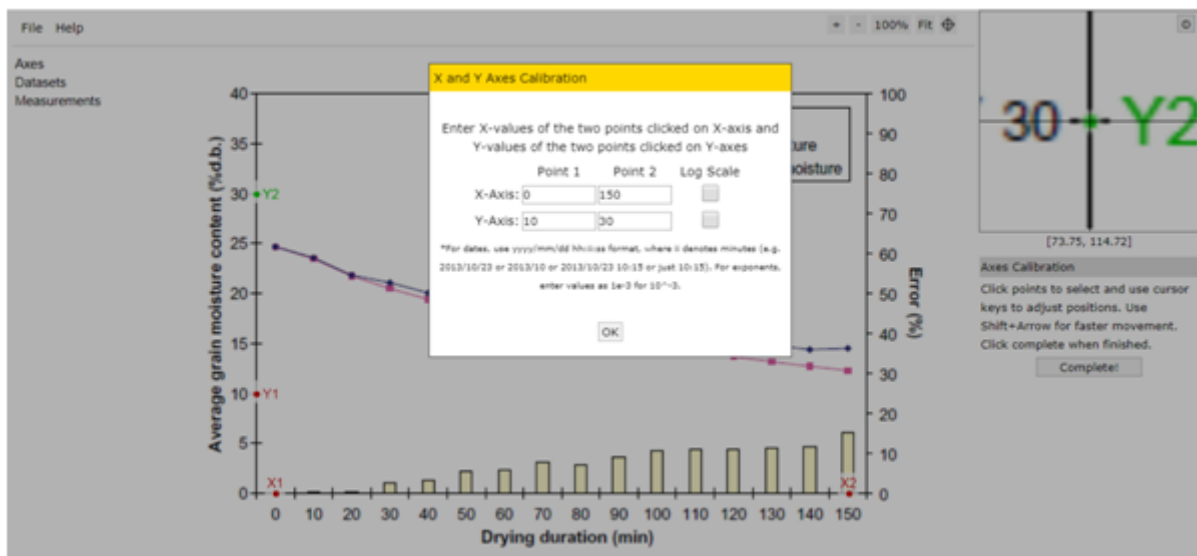
**Figura 37 – Escolha dos pontos a serem definidos**



Fonte: Desenvolvido pela autora

É importante ressaltar que há uma pequena área que mostra um zoom da figura, a fim de que a precisão seja aumentada. Terminado o procedimento, basta clicar no botão *COMPLETE* e inserir os devidos valores relativos aos pontos, conforme mostrado na figura 38. Terminado este procedimento, clique em *OK*.

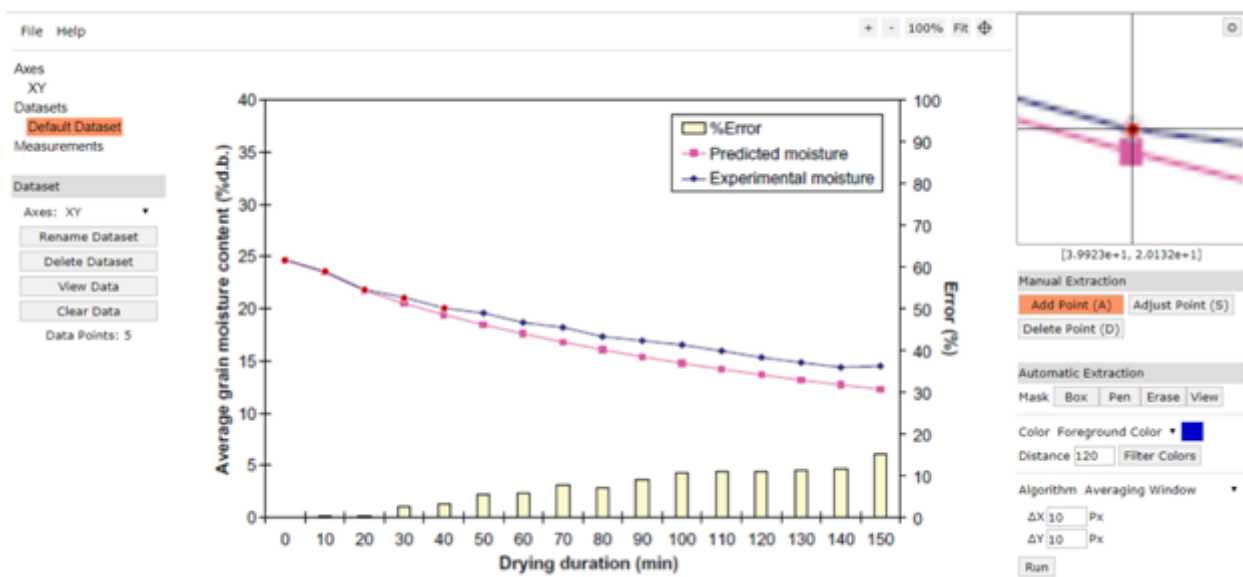
Figura 38 – Definição dos valores dos pontos escolhidos



Fonte: Desenvolvido pela autora

A retirada dos pontos é feita de forma manual. Para tal, basta certificar-se de que o botão *ADD POINT* (A), no canto direito, esteja selecionado. Em caso afirmativo, basta selecionar no gráfico os pontos desejados. Para visualizar os valores dos pontos selecionados, basta clicar em *VIEW DATA*, presente no canto esquerdo da tela, conforme mostrado na figura 39.

Figura 39 – Retirada dos dados presentes no gráfico



Fonte: Desenvolvido pela autora

Apesar de apresentar uma boa precisão, este aplicativo nem sempre consegue fazer a retirada do ponto com o valor exato, no eixo X. A fim de corrigir esta pequena discrepância, é necessário que os valores retirados sejam interpolados. Nota-se aqui que este procedimento pode ser feito tranquilamente, pois os pontos obtidos estão bem próximos dos pontos redondos.

A literatura apresenta 8 diferentes gráficos. Seus dados são retirados de acordo com o procedimento descrito acima e apresentados nas tabelas 18 a 25.

**Tabela 18 – Dados retirados para o caso 1 no intervalo de 8 e 9 cm**

T = 50 °C; G = 0.22 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 8-9 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0	24,80	0	24,70	0	24,80	0	24,80
10,03	23,52	10,03	23,52	10	23,52	10	23,52
20,07	21,85	20,07	21,65	20	21,86	20	21,66
30,11	21,15	30,10	20,47	30	21,16	30	20,48
40,14	20,07	40,14	19,48	40	20,09	40	19,49
50,17	19,57	49,91	18,49	50	19,58	50	18,48
60,21	18,59	56,95	17,60	60	18,61	60	17,39
69,98	18,28	69,98	16,72	70	18,28	70	16,72
80,02	17,40	80,02	15,92	80	17,4	80	15,92
90,05	16,90	90,05	15,33	90	16,90	90	15,33
100,09	16,50	100,09	14,74	100	16,5	100	14,75
109,86	15,91	109,86	14,24	110	15,9	110	14,23
120,15	15,21	120,15	13,64	120	15,22	120	13,65
130,19	14,72	130,19	13,15	130	14,73	130	13,16
140,22	14,32	140,22	12,55	140	14,33	140	12,56
150	14,42	150	12,25	150	14,42	150	12,25

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 19 – Dados retirados para o caso 1 no intervalo de 17 e 18 cm**

T = 50 °C; G = 0.22 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 17-18 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0	24,68	0	24,68	0	24,68	0	24,68
10,22	24,31	9,97	24,4	10	24,32	10	24,4
20,19	23,75	19,93	23,57	20	23,76	20	23,56
30,15	22,26	29,9	21,89	30	22,28	30	21,88
40,12	21,71	40,12	20,86	40	21,72	40	20,87
50,09	20,88	50,09	19,85	50	20,89	50	19,86
60,05	20,13	60,05	18,92	60	20,13	60	18,92
70,02	19,21	70,02	18,18	70	19,21	70	18,18
80,24	19,02	79,98	17,44	80	19,02	80	17,44
89,95	18,38	89,95	16,79	90	18,38	90	16,79
100,17	17,82	99,91	16,05	100	17,83	100	16,04
110,14	17,27	109,88	15,49	110	17,28	110	15,48
119,85	16,99	119,85	14,84	120	16,98	120	14,83
129,81	16,44	129,81	14,29	130	16,43	130	14,28
139,79	15,88	139,78	13,83	140	15,87	140	13,82
150	15,52	150	13,27	150	15,52	150	13,27

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 20 – Dados retirados para o caso 2 no intervalo de 8 e 9 cm**

T = 45 °C; G = 0.22 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 8-9 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0	25,94	0	25,94	0	25,94	0	25,94
9,92	24,62	9,92	24,91	10	24,61	10	24,9
19,83	23,30	19,83	23,21	20	23,29	20	23,19
29,75	22,45	29,75	21,98	30	22,43	30	21,95
39,92	21,51	39,67	20,94	40	21,50	40	20,91
49,83	20,85	49,83	20,00	50	20,84	50	19,99
59,75	20,38	60,19	19,15	60	20,36	60	19,17
69,92	19,72	69,92	18,40	70	19,71	70	18,39
79,83	18,96	79,83	17,64	80	18,95	80	17,63
89,75	18,58	89,75	17,08	90	15,58	90	17,06
99,92	18,49	99,97	16,42	100	18,49	100	16,42
109,83	18,02	109,83	15,85	110	18,02	110	15,84
119,75	17,74	119,75	15,38	120	17,72	120	15,37
129,67	16,98	129,92	14,91	130	16,97	130	14,91
139,83	16,70	139,83	14,43	140	16,60	140	14,42
150	16,13	149,75	13,96	150	16,13	150	13,96

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 21 – Dados retirados para o caso 2 no intervalo de 17 e 18 cm**

T = 45 °C; G = 0.22 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 17-18 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0,30	25,80	0,30	25,80	0	25,94	0	25,94
10,32	25,35	10,55	25,53	10	25,36	10	25,54
20,12	24,99	20,35	24,98	20	24,99	20	25,00
30,14	23,91	30,36	23,37	30	23,93	30	23,43
40,15	22,74	40,15	22,21	40	22,76	40	22,23
50,18	22,02	50,17	21,31	50	22,03	50	21,33
60,20	21,57	60,19	20,41	60	21,58	60	20,43
70,22	20,94	70,21	19,60	70	20,95	70	19,62
80,25	20,31	80,00	18,88	80	20,33	80	18,88
90,27	20,03	90,03	18,16	90	20,04	90	18,16
100,07	19,04	100,05	17,53	100	19,05	100	17,53
110,09	18,86	110,30	16,90	110	18,86	110	16,92
120,12	18,50	120,10	16,35	120	18,5	120	16,36
130,15	18,04	130,12	15,81	130	18,05	130	15,82
140,17	17,50	140,14	15,27	140	17,51	140	15,28
150,19	16,96	150,17	14,82	150	16,97	150	16,98

Fonte: Desenvolvido pela autora



**Tabela 22 – Dados retirados para o caso 3 no intervalo de 8 e 9 cm**

T = 50 °C; G = 0.16 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 8-9 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0,26	24,72	0,26	24,72	0	24,74	0	24,74
10,26	24,10	10,26	24,20	10	24,12	10	24,21
20,00	22,57	20,00	22,41	20	22,57	20	22,41
30,00	21,55	30,00	21,14	30	21,55	30	21,14
40,00	21,14	40,00	19,92	40	21,14	40	19,92
50,00	20,22	50,26	19,00	50	20,22	50	19,02
60,00	19,09	60,00	18,08	60	19,09	60	18,08
70,00	18,58	70,00	17,26	70	18,58	70	17,26
80,00	18,06	80,00	16,64	80	18,06	80	16,64
90,00	17,25	90,00	15,82	90	17,25	90	15,92
99,74	17,04	99,74	15,21	100	17,02	100	15,19
110,00	16,32	110,00	14,59	110	16,32	110	14,59
119,74	15,91	120,00	13,98	120	15,9	120	13,98
129,74	15,39	129,74	13,56	130	15,38	130	13,55
139,74	14,98	139,74	13,05	140	14,97	140	13,04
150,00	14,67	150,00	12,53	150	14,67	150	12,53

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 23 – Dados retirados para o caso 3 no intervalo de 17 e 18 cm**

T = 50 °C; G = 0.16 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 17-18 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0,00	24,74	0,00	24,74	0	24,74	0	24,74
9,90	24,55	10,15	24,45	10	24,55	10	24,45
20,05	24,45	19,80	24,83	20	24,45	20	24,81
29,95	23,97	29,95	23,68	30	23,96	30	23,67
39,85	22,92	40,10	22,06	40	22,9	40	22,09
50,00	21,87	50,00	20,91	50	21,87	50	20,91
59,90	21,39	60,15	20,05	60	21,38	60	20,06
70,05	20,33	69,80	19,19	70	20,34	70	19,17
79,95	20,14	79,95	18,33	80	20,14	80	18,33
89,85	19,47	89,85	17,56	90	19,46	90	17,55
100,00	18,52	100,00	16,99	100	18,52	100	16,99
109,90	18,13	109,90	16,22	110	18,52	110	16,21
119,80	17,66	119,80	15,65	120	17,65	120	15,64
129,70	17,27	130,20	15,07	130	17,25	130	15,08
139,85	16,51	139,85	14,50	140	16,5	140	14,49
150,00	16,03	150,00	13,91	150	16,03	150	13,91

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 24 – Dados retirados para o caso 4 no intervalo de 8 e 9 cm**

T = 45 °C; G = 0.16 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 17-18 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0,25	25,05	0,25	25,05	0	25,07	0	25,07
9,90	24,27	10,15	24,47	10	24,26	10	24,46
20,05	22,91	20,05	23,01	20	22,92	20	23,02
29,95	22,43	29,95	21,75	30	22,42	30	21,75
40,01	21,36	40,10	20,87	40	21,36	40	20,88
50,00	20,97	50,25	20,00	50	20,97	50	20,02
59,90	20,00	59,90	19,13	60	20,00	60	19,12
69,80	19,51	69,80	18,45	70	19,5	70	18,43
79,95	19,03	79,95	17,67	80	19,03	80	17,67
89,85	18,35	90,10	17,09	90	18,34	90	17,1
99,75	17,77	100,00	16,5	100	17,77	100	16,50
109,90	17,57	109,90	15,92	110	17,57	110	15,92
119,80	17,28	119,80	15,53	120	17,27	120	15,52
129,95	16,89	129,95	14,95	130	16,89	130	14,95
139,85	16,80	139,85	14,47	140	16,79	140	14,46
150,00	16,41	150,00	14,08	150	16,41	150	14,08

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 25 – Dados retirados para o caso 4 no intervalo de 17 e 18 cm**

T = 45 °C; G = 0.16 kg/m <sup>2</sup> s; Intervalo = 17-18 (cm)							
Dados sem interpolação				Dados com interpolação			
Experimental		Numérico pelo MDF		Experimental		Numérico pelo MDF	
T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)	T (min)	M (kg/kg)
0,00	25,17	0,00	25,07	0	25,07	0	25,07
9,68	24,4	9,67	24,88	10	24,4	10	24,87
19,66	24,40	19,90	25,17	20	24,38	20	25,16
29,65	23,91	29,65	24,40	30	23,89	30	24,35
39,64	23,24	39,65	22,95	40	23,23	40	22,91
49,63	22,85	49,64	21,88	50	22,81	50	21,85
59,63	21,79	59,64	20,92	60	21,77	60	20,9
69,62	21,30	69,63	20,24	70	21,29	70	20,21
79,60	21,11	79,62	19,56	80	21,08	80	19,53
89,60	20,34	89,86	18,79	90	20,31	90	18,78
99,59	19,66	99,61	18,12	100	19,64	100	18,09
109,58	19,08	109,85	17,44	110	19,06	110	17,43
119,57	18,70	119,59	16,86	120	18,68	120	16,84
129,56	18,21	129,83	16,47	130	18,10	130	16,46
139,54	18,02	139,57	15,89	140	18,02	140	15,57
150,00	17,92	149,81	15,41	150	17,92	150	15,40

Fonte: Desenvolvido pela autora

## APÊNDICE C – CÁLCULO DOS ERROS OBTIDOS COM CADA SIMULAÇÃO

Este anexo objetiva apresentar a memória de cálculo dos erros obtidos para cada simulação feita. Os modelos simplificado e completo são comparados com os dados experimentais, para cada caso apresentado, conforme consta nas tabelas 26 a 33.

**Tabela 26 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 1, no intervalo entre 8 e 9 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,25	0,25	0,44	0,25	0,44
10	0,24	0,24	1,58	0,24	0,75
20	0,22	0,23	4,84	0,22	2,43
30	0,21	0,22	3,36	0,21	0,48
40	0,20	0,21	3,83	0,20	1,32
50	0,20	0,20	1,72	0,19	4,59
60	0,19	0,19	2,31	0,18	5,33
70	0,18	0,18	0,27	0,17	9,01
80	0,17	0,17	0,38	0,16	9,71
90	0,17	0,17	0,89	0,15	12,14
100	0,17	0,16	2,66	0,14	14,89
110	0,16	0,15	3,08	0,13	16,42
120	0,15	0,15	2,81	0,13	17,33
130	0,15	0,14	3,61	0,12	19,08
140	0,14	0,14	4,82	0,11	21,15
150	0,14	0,13	9,18	0,11	25,69

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 27 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 1, no intervalo entre 17 e 18 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,25	0,25	0,04	0,25	0,04
10	0,24	0,24	1,25	0,24	1,49
20	0,24	0,24	0,46	0,23	1,18
30	0,22	0,23	4,52	0,23	2,65
40	0,22	0,23	5,52	0,22	1,60
50	0,21	0,23	7,88	0,21	1,60
60	0,20	0,22	9,93	0,20	1,23
70	0,19	0,22	12,90	0,20	1,72
80	0,19	0,21	11,61	0,19	1,57
90	0,18	0,21	12,96	0,18	2,48
100	0,18	0,20	13,82	0,17	3,81
110	0,17	0,20	14,72	0,16	5,07
120	0,17	0,19	13,99	0,16	7,62
130	0,16	0,19	14,98	0,15	8,74
140	0,16	0,18	16,16	0,14	9,69
150	0,16	0,18	15,86	0,14	11,75

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 28 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 2, no intervalo entre 8 e 9 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,26	0,26	0,27	0,26	0,27
10	0,25	0,25	1,87	0,25	1,15
20	0,23	0,24	4,11	0,24	1,90
30	0,22	0,23	4,03	0,23	0,36
40	0,22	0,22	4,19	0,21	0,61
50	0,21	0,22	3,39	0,20	2,62
60	0,20	0,21	1,82	0,19	5,27
70	0,20	0,20	1,32	0,18	6,84
80	0,19	0,19	1,54	0,18	7,53
90	0,16	0,19	19,02	0,17	7,34
100	0,19	0,18	3,30	0,16	13,68
110	0,18	0,17	4,25	0,15	15,34
120	0,18	0,17	6,04	0,15	17,81
130	0,17	0,16	5,31	0,14	18,06
140	0,17	0,16	6,50	0,13	20,00
150	0,16	0,15	7,06	0,13	21,35

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 29 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 2, no intervalo entre 17 e 18 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,26	0,26	0,27	0,26	0,27
10	0,25	0,25	0,79	0,25	1,02
20	0,25	0,25	0,82	0,25	1,49
30	0,24	0,24	2,10	0,24	0,73
40	0,23	0,24	5,82	0,23	3,03
50	0,22	0,24	7,80	0,23	3,19
60	0,22	0,23	8,52	0,22	1,91
70	0,21	0,23	10,18	0,21	1,42
80	0,20	0,23	11,79	0,21	0,91
90	0,20	0,22	11,54	0,20	1,23
100	0,19	0,22	15,31	0,19	0,17
110	0,19	0,22	14,39	0,18	2,45
120	0,19	0,21	14,47	0,18	4,21
130	0,18	0,21	15,10	0,17	5,46
140	0,18	0,20	16,36	0,16	6,18
150	0,17	0,20	17,71	0,16	6,83

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 30 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 3, no intervalo entre 8 e 9 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,25	0,25	0,04	0,25	0,04
10	0,24	0,24	0,27	0,24	0,57
20	0,23	0,24	4,27	0,23	2,51
30	0,22	0,23	5,90	0,22	2,23
40	0,21	0,22	4,34	0,21	1,02
50	0,20	0,21	5,28	0,20	1,71
60	0,19	0,21	7,62	0,19	1,13
70	0,19	0,20	6,66	0,18	3,42
80	0,18	0,19	5,85	0,17	5,53
90	0,17	0,18	6,91	0,16	5,94
100	0,17	0,18	4,53	0,15	9,32
110	0,16	0,17	5,18	0,15	9,92
120	0,16	0,17	4,17	0,14	11,97
130	0,15	0,16	3,93	0,13	13,41
140	0,15	0,15	3,07	0,13	15,23
150	0,15	0,15	1,54	0,12	17,69

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 31 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 3, no intervalo entre 17 e 18 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,25	0,25	0,04	0,25	0,04
10	0,25	0,24	1,91	0,24	2,19
20	0,24	0,24	2,90	0,24	3,58
30	0,24	0,23	2,03	0,23	3,30
40	0,23	0,23	1,32	0,23	0,89
50	0,22	0,23	4,85	0,22	1,41
60	0,21	0,23	5,98	0,22	0,93
70	0,20	0,22	10,09	0,21	2,92
80	0,20	0,22	9,87	0,20	0,66
90	0,19	0,22	12,38	0,20	0,72
100	0,19	0,22	16,72	0,19	2,20
110	0,19	0,21	15,37	0,18	1,37
120	0,18	0,21	19,66	0,18	0,22
130	0,17	0,21	21,01	0,17	1,67
140	0,17	0,21	25,02	0,16	1,01
150	0,16	0,20	27,09	0,16	1,98

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Tabela 32 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 4, no intervalo entre 8 e 9 cm**

Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,25	0,25	0,20	0,25	0,20
10	0,24	0,24	0,66	0,24	0,38
20	0,23	0,24	4,47	0,24	3,04
30	0,22	0,23	4,25	0,23	0,96
40	0,21	0,23	6,46	0,22	1,33
50	0,21	0,22	5,31	0,21	1,34
60	0,20	0,21	7,23	0,20	1,15
70	0,20	0,21	6,73	0,19	3,11
80	0,19	0,20	6,11	0,18	5,12
90	0,18	0,20	6,88	0,17	5,77
100	0,18	0,19	7,05	0,17	6,86
110	0,18	0,18	5,06	0,16	9,80
120	0,17	0,18	3,76	0,15	12,04
130	0,17	0,17	2,98	0,15	13,79
140	0,17	0,17	0,56	0,14	16,92
150	0,16	0,16	0,14	0,13	18,57

Fonte: Desenvolvido pela autora



**Tabela 33 – Resultados numérico e experimental, com os erros relativos para o caso 4, no intervalo entre 17 e 18 cm**

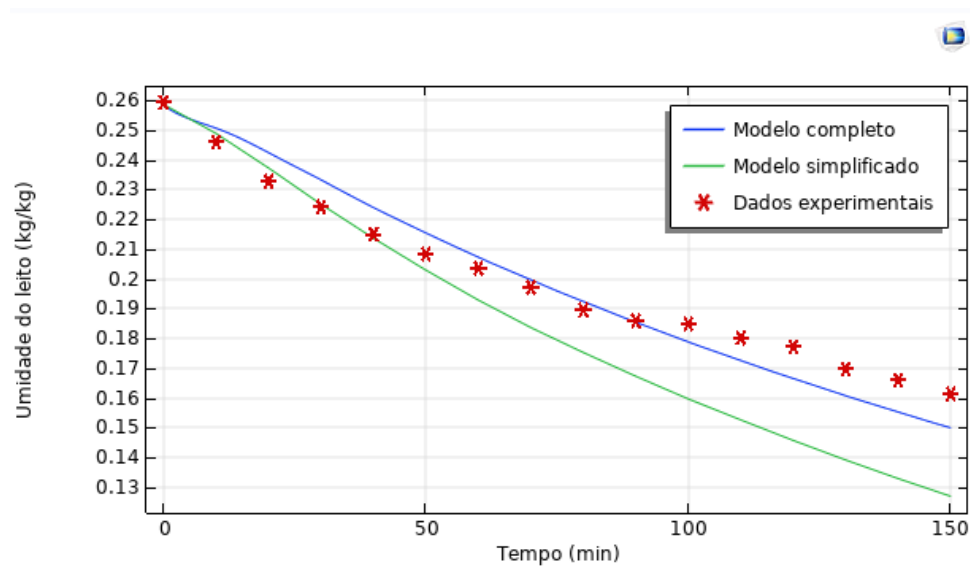
Tempo (min)	Experimental (kg/kg)	Modelo completo (kg/kg)	Erro (%)	Modelo simplificado (kg/kg)	Erro (%)
0	0,25	0,25	0,20	0,25	0,20
10	0,24	0,24	0,17	0,24	0,06
20	0,24	0,24	1,17	0,24	1,81
30	0,24	0,24	0,24	0,24	1,43
40	0,23	0,24	1,48	0,23	0,36
50	0,23	0,23	2,22	0,23	0,38
60	0,22	0,23	5,95	0,22	2,24
70	0,21	0,23	7,17	0,22	2,16
80	0,21	0,23	7,08	0,21	0,59
90	0,20	0,22	9,98	0,21	1,56
100	0,20	0,22	12,55	0,20	2,04
110	0,19	0,22	14,77	0,19	2,06
120	0,19	0,22	15,90	0,19	0,99
130	0,18	0,21	18,39	0,18	1,02
140	0,18	0,21	17,70	0,18	1,73
150	0,18	0,21	17,16	0,17	4,35

Fonte: Desenvolvido pela autora

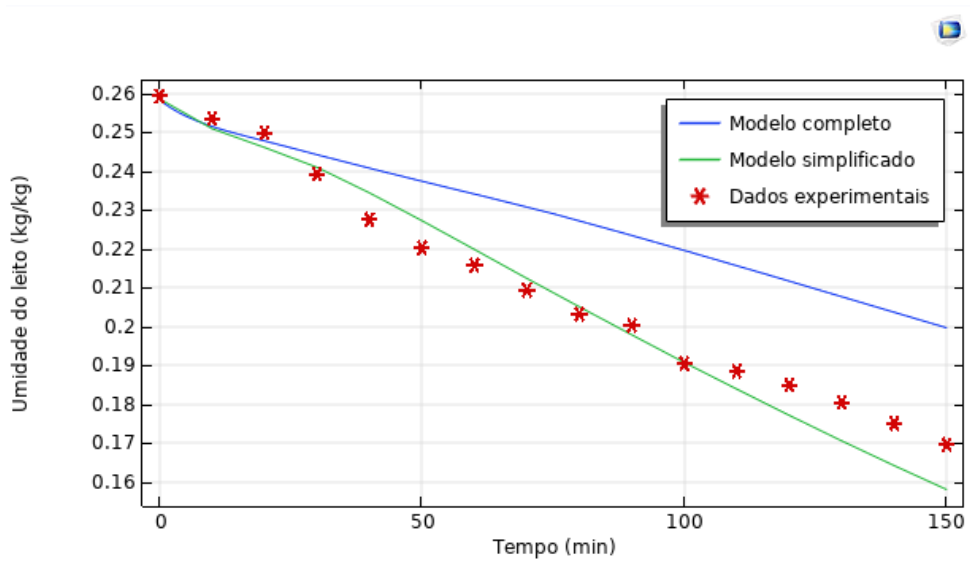
## APÊNDICE D – GRÁFICOS: COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS COMPLETO E SIMPLIFICADO

Esta seção contém os gráficos comparativos entre os modelos completo e simplificado, para os casos 2, 3 e 4 - figuras 40, 41 e 42, respectivamente.

**Figura 40 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 2**



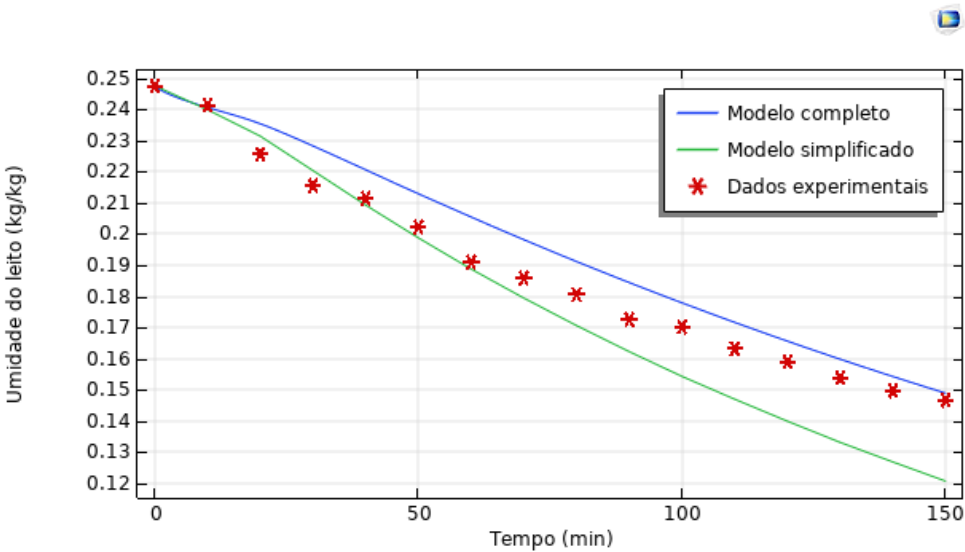
**(a) Intervalo entre 8 e 9 cm**



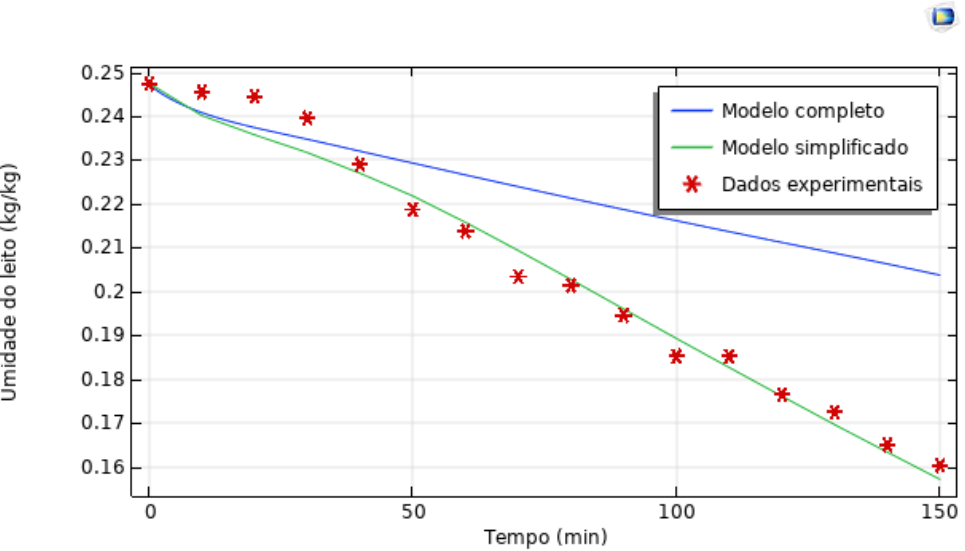
**(b) Intervalo entre 17 e 18 cm**

Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 41 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 3



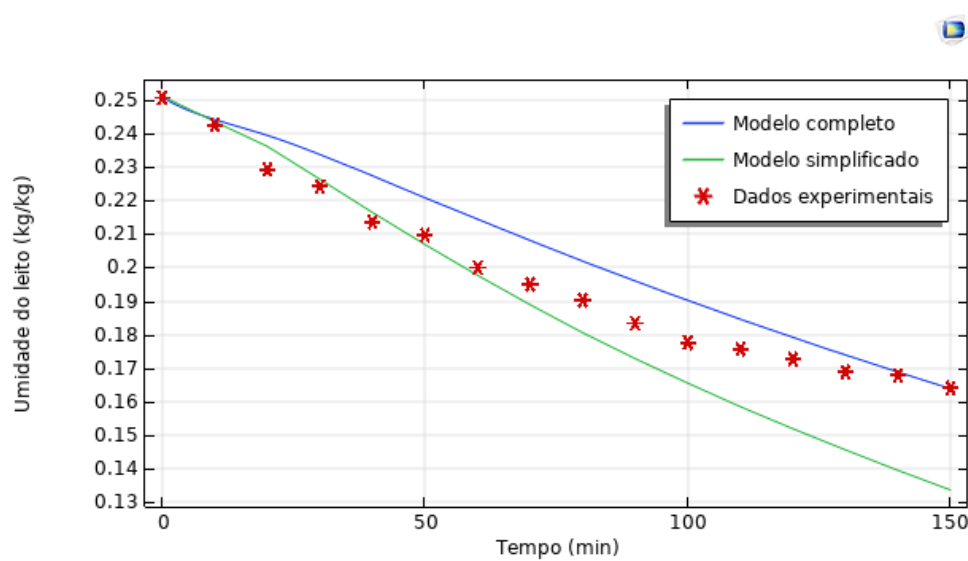
(a) Intervalo entre 8 e 9 cm



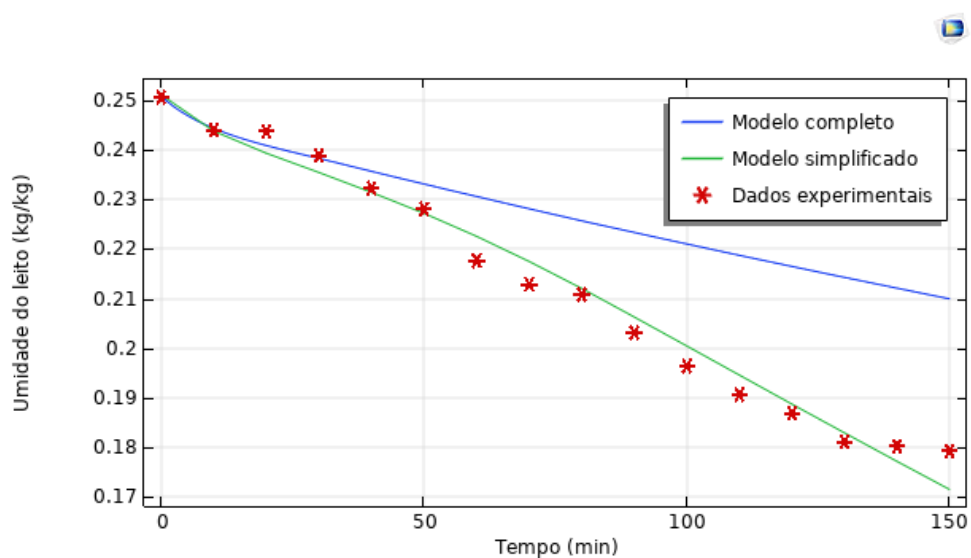
(b) Intervalo entre 17 e 18 cm

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Figura 42 – Confronto entre modelos completo e simplificado: caso 4**



**(a) Intervalo entre 8 e 9 cm**



**(b) Intervalo entre 17 e 18 cm**

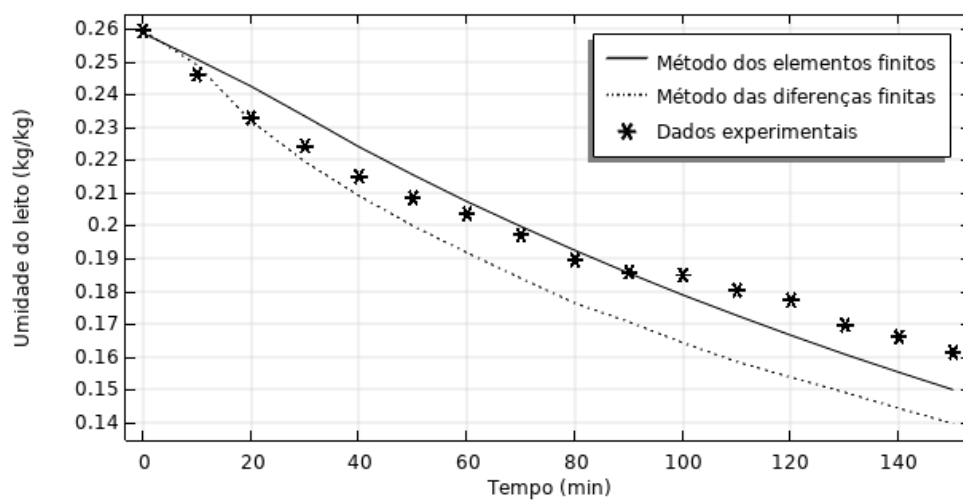
Fonte: Desenvolvido pela autora

Os demais casos corroboram a conclusão tirada à partir da análise do caso 1: o modelo completo apresenta maior precisão para análises localizadas mais próximas da entrada de ar quente, enquanto que o modelo simplificado apresenta melhores resultados para análises localizadas mais distantes da entrada de ar quente.

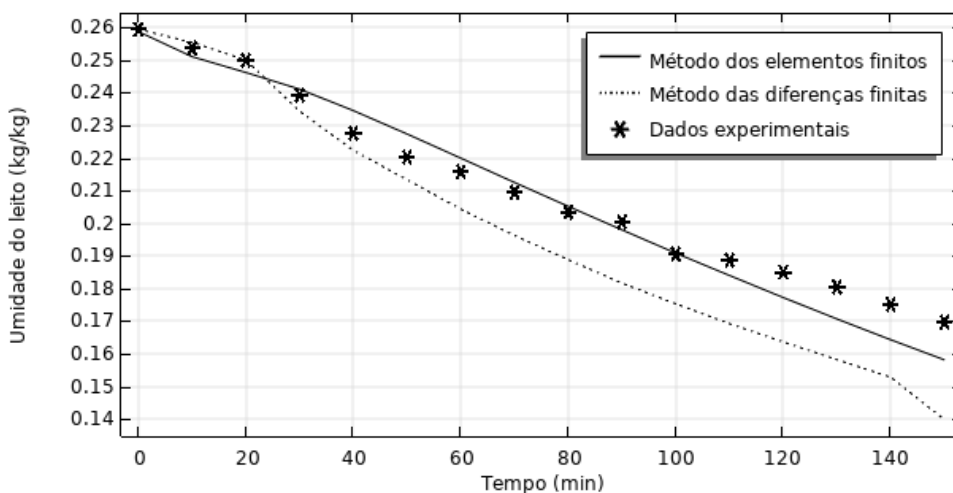
## APÊNDICE E – GRÁFICOS: CONFRONTO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS POR MEF E MDF

Esta seção contém os gráficos comparativos entre os resultados numéricos obtidos pelo método das diferenças finitas (MDF) e o método dos elementos finitos (MEF), para os casos 2, 3 e 4 - figuras 43, 44 e 45, respectivamente.

Figura 43 – Confronto entre resultados obtidos por MEF e MDF: caso 2



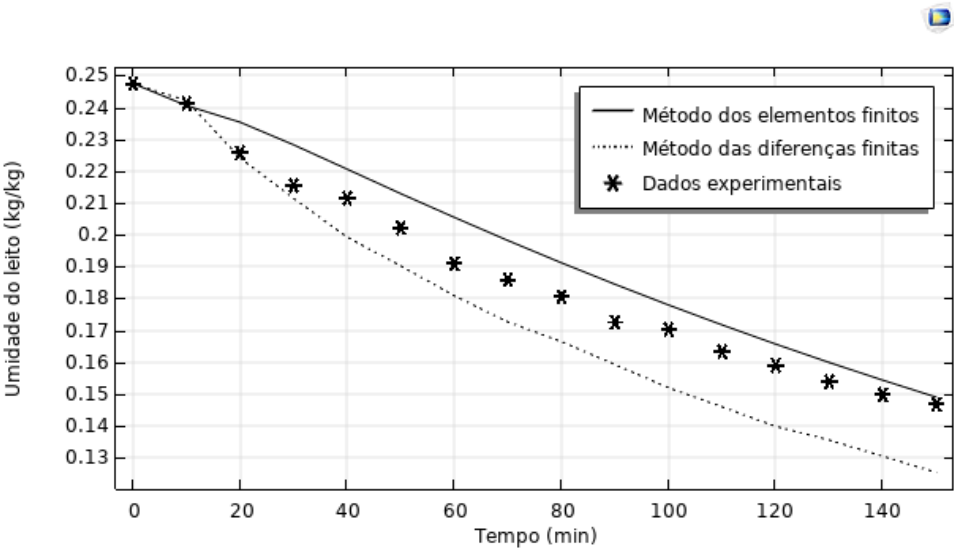
(a) Intervalo entre 8 e 9 cm



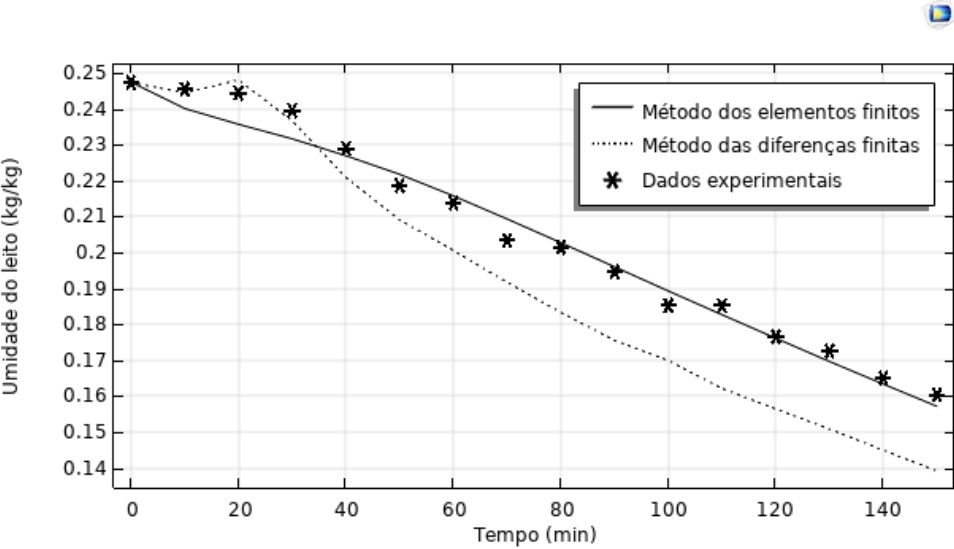
(b) Intervalo entre 17 e 18 cm

Fonte: Desenvolvido pela autora

Figura 44 – Confronto entre resultados obtidos por MEF e MDF: caso 3



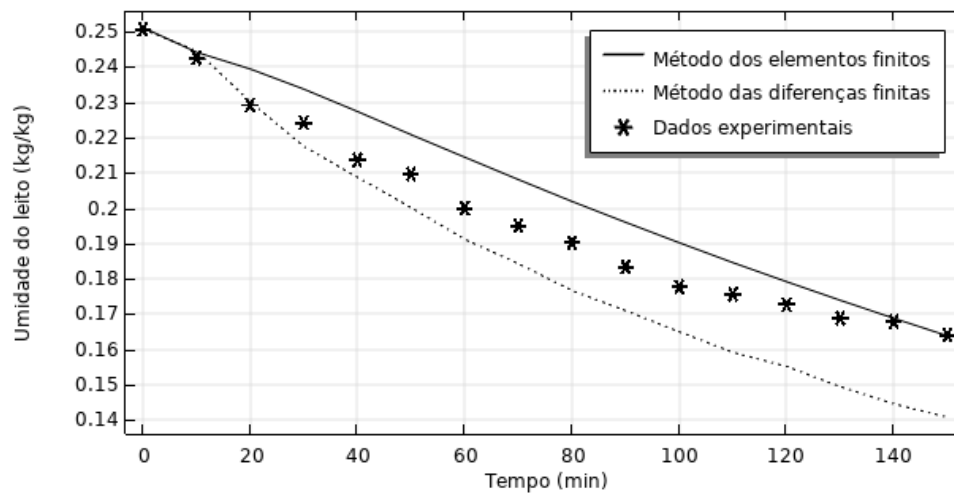
(a) Intervalo entre 8 e 9 cm



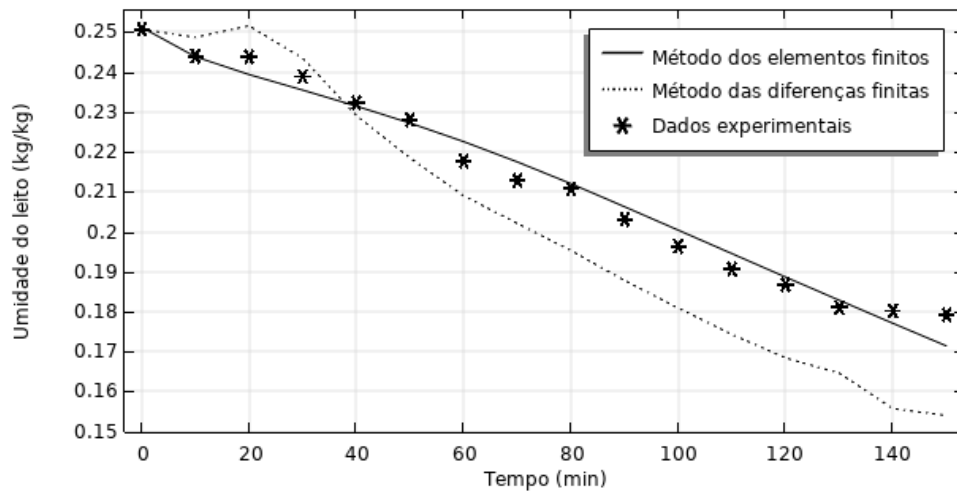
(b) Intervalo entre 17 e 18 cm

Fonte: Desenvolvido pela autora

**Figura 45 – Confronto entre resultados obtidos por MEF e MDF: caso 4**



**(a) Intervalo entre 8 e 9 cm**



**(b) Intervalo entre 17 e 18 cm**

Fonte: Desenvolvido pela autora

Os demais casos corroboram a conclusão tirada à partir da análise do caso 1: o modelo apresentado neste trabalho apresenta maior precisão do que aquele apresentado na literatura.